

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 - Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Vliv technologických parametrů ultrazvukového svařování na pevnost svarového spoje

Influence of technological parameters of ultrasonic welding on strength of weld joint

Juraj Gürtler
KSP – TP – 764

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Petr LENFELD - *TU v Liberci*
Konzultant diplomové práce: Ing. Daniel Hušek – *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	64
Počet tabulek	14
Počet příloh	0
Počet obrázků	42

Datum: 25.5.2007

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství

Diplomant: Juraj Gürtler

Téma práce: Vliv technologických parametrů ultrazvukového svařování na pevnost svarového spoje
Influence of technological parameters of ultrasonic welding on strength of weld joint

Číslo DP: KSP-TP – 764

Vedoucí DP: doc. Dr. Ing. Petr LENFELD - *TU v Liberci*
Konzultant: Ing. Daniel Hušek – *TU v Liberci*

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá ultrazvukovým svařováním amorfního termoplastu bez přidaných plniv. Cílem bylo zjistit vliv vybraných technologických parametrů ultrazvukového svařovacího procesu na pevnost svarového spoje, ale také na jeho vzhled. V závěru je uveden vliv změny vybraných technologických parametrů a doporučení jejich vhodných rozsahů.

The abstract:

Diploma work deals with ultrasonic welding of amorphous thermoplastic without additional fillers. The subject of this diploma work was to find out influence of chosen technological parameters of ultrasonic welding on strength of weld joint and appearance of weld joint. Conclusion contains the evaluation of the influence of change of choose technological parameters and recommendation of suitable range of ultrasonic parameters.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2007

.....
Juraj Görtler
Na Úbočí 8
466 05 Jablonec n/N

Poděkování:

Na začátku práce bych rád poděkoval doc. Dr. Ing. Petru LENFELDOVI a Ing. Danielu Huškovi za ochotu a odbornou pomoc v průběhu řešení této diplomové práce.

OBSAH:

1. Úvod	10
2. Teoretická část	11
2.1. Princip ultrazvukového svařování	11
2.2. Svařovací cyklus	11
2.3. Prvky systému a funkce	13
2.4. Svařování v blízkém a dalekém poli	14
2.5. Svařitelnost, podmínky, vlivy	16
2.5.1. Struktura plastů	16
2.5.1.1. Amorfnní termoplasty	17
2.5.1.2. Semikrystalické termoplasty	19
2.5.2. Kompatibilita materiálů	21
2.5.3. Navlhavost plastů	22
2.5.4. Vliv aditiv na svařitelnost	23
2.2.4.1. Maziva	23
2.2.4.2. Separátory	24
2.2.4.3. Plniva	24
2.2.4.4. Retardéry hoření	25
2.2.4.5. Barviva	25
2.2.4.6. Recyklát	25
2.6. Požadavky na konstrukci spoje a součásti	26
2.6.1. Usměřovač energie	26
2.6.2. Typy spojů	28
2.6.2.1. Spoj na tupo	29
2.6.2.2. Stupňový spoj	29
2.6.2.3. Spoj pero-drážka	30
2.6.2.4. Střížný spoj	31
2.6.2.5. Šikmý spoj	33
2.6.2.6. Bodový svar	33
3. Praktická část	35
3.1. Experiment a cíl diplomové práce	35
3.2. Volba materiálu	35
3.2.1. Charakteristika materiálu	36

3.3. Příprava zkušebních vzorků	37
3.3.1. Výroba tyček	38
3.3.1.1. Zařízení použité na výrobu tyček	38
3.3.2. Svařování zkušebních vzorků	39
3.3.2.1. Zařízení použité při svařování	41
3.4. Měření rozměru zkušebního vzorku v místě svaru	42
3.5. Měření pevnosti svaru	42
3.5.1. Použité zařízení	43
4. Naměřené výsledky a jejich vyhodnocení	44
4.1. Vliv velikosti svařovacího tlaku na pevnost a rozměr svarového spoje	45
4.1.1. Vyhodnocení vlivu velikosti svařovacího tlaku na pevnost a rozměr svarového spoje	47
4.2. Vliv velikosti dotlaku na pevnost a rozměr svarového spoje	48
4.2.1. Vyhodnocení vlivu velikosti dotlaku na pevnost a rozměr svarového spoje	50
4.3. Vliv času dotlaku na pevnost a rozměr svarového spoje	51
4.3.1. Vyhodnocení vlivu času dotlaku na pevnost a rozměr svarového spoje	53
4.4. Vliv amplitudy ultrazvukových kmitů na pevnost a rozměr svarového spoje	54
4.4.1. Vyhodnocení vlivu amplitudy ultrazvukových kmitů na pevnost a rozměr svarového spoje	56
4.5. Vliv mezery mezi součástmi na pevnost a rozměr svarového spoje	57
4.5.1. Vyhodnocení vlivu mezery mezi součástmi na pevnost a rozměr svarového spoje	59
5. Závěr	60
Použitá literatura	62

Seznam použitých zkratk a symbolů:

ABS	Akrylonitril-butadien-styrén
ASA	Akrylonitril-styrén-akrylát
HDPE	Vysokohustotní polyetylén
HIPS	Houževnatý polystyrén
LCP	Tekuté krystaly copolyester
LDPE	Nízkohustotní polyetylén
PA	Polyamid
PBT	Polybutyléntereftalát
PC	Polykarbonát
PE	Polyetylén
PEEK	Polyethéréthérketon
PEI	Polyetherimid
PES	Polyéthersulfon
PET	Polyethyléntereftalát
PTFE	Polytetrafluoretylén
PMMA	Polymethylmetakrylát
POM	Polyoximethylen
PP	Polypropylen
PPO	Polyfenylenoxid
PPS	Polyfenylénsulfid
PS	Polystyrén
PSU	Polysulfon
PUR	Polyuretan
PVC	Polyvinylchlorid
SAN	Styrén-akrylonitril
SB	Styren-Butadien
UHMWPE	Ultra vysoce molekulární polyetylen
T_g [°C]	Teplota zesklňování
T_f [°C]	Teplota viskózního toku
T_m [°C]	Teplota tání
σ_B [MPa]	Mez pevnosti v tahu
ϵ_B [%]	Prodloužení na mez pevnosti v tahu

Cr		Rovnovážná vlhkost
p	[kPa]	Svařovací tlak
p _d	[kPa]	Dotlak
t _d	[s]	Čas dotlaku
t _m	[s]	Maximální svařovací čas
Y	[μm]	Amplituda
h	[mm]	Mezera mezi součástmi

1. Úvod

Ultrazvukové svařování termoplastů se objevilo v polovině šedesátých let. Zpočátku bylo používáno na svařování některých druhů amorfních termoplastů, které byly vlivem své tuhosti a nízké teplotě tavení snadno svařitelné. S rozvojem této technologie si však našlo ultrazvukové svařování uplatnění i u svařování semikrystalických termoplastů. Ultrazvukové svařování termoplastů je rychlý, čistý, účinný a opakovatelný proces, který vytváří silný jednotný spoj při spotřebě velmi malého množství energie. Pro vytvoření svarového spoje není potřeba žádné rozpouštědlo, lepidlo či mechanické nebo vnější teplo. Výsledný spoj je pevný a čistý. Mohou být svařovány i náročné plasty. Ultrazvukové svařování je velice vhodná technologie pro zařazení do automatizovaného procesu spojování plastových dílů. Svařovací automaty mají velkou produktivitu, protože přenos energie do spoje a uvolnění energie nastane velmi rychle a to pouze v omezené bezprostřední oblasti spoje. Takto rychlý rozptyl tepla činí tento proces podstatně rychlejším než jsou ostatní metody svařování plastů. Systém nástrojů ultrazvukového svařování a jeho aplikace mohou být rychle měněny což nabízí vysokou flexibilitu svařování. Díky vysoké flexibilitě a produktivitě výroby nachází ultrazvukové svařování uplatnění v široké oblasti průmyslu, která se zabývá výrobou plastových výrobků. V automobilovém průmyslu se například ultrazvukové svařování používá při výrobě interiérových dílů jako jsou například dveřní výplně, které se skládají z několika svařených dílů. Kvalita vzniklého spoje tj. mechanické vlastnosti, vzhled či neprodyšnost závisí nejen na vlastnostech spojovaných plastových dílů a parametrech svařovacího automatu, ale i na technologických parametrech svařovacího procesu.

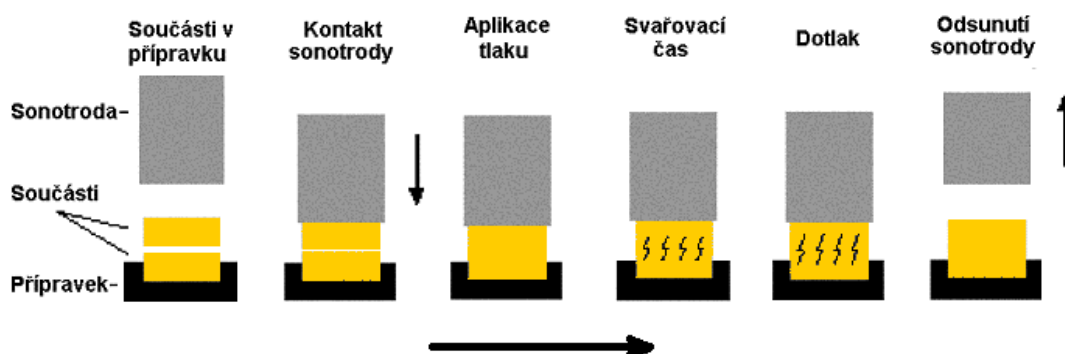
Diplomová práce se zabývá zjišťováním vlivu vybraných technologických parametrů svařovacího procesu na kvalitu svarového spoje. Do vybraných technologických parametrů patří velikost svařovacího tlaku, velikost dotlaku, doba dotlaku a velikost amplitudy, kterou kmitá ultrazvukový nástroj. Cílem diplomové práce bylo popsat vliv jednotlivých technologických parametrů na pevnost a vzhled spoje a zjistit neoptimálnější hodnoty vybraných parametrů pro zajištění kvalitního svarového spoje.

2.1. Princip ultrazvukového svařování [1] [2]

Ultrazvukové svařování plastů je svařování termoplastů pomocí tlaku a tepla generovaného z mechanického pohybu. Sonotroda je přivedena na dotek s jednou ze součástí (viz. obr. 2.1.), kde aplikovaný tlak a vibrační ultrazvuková energie, procházející skrz materiál, vytváří třecí teplo mezi dvěma povrchy součástí a mezi molekulami plastu v oblasti spoje. Takto vzniklé teplo způsobuje měknutí plastu. Tato reakce se sama od sebe začne urychlovat, protože tlumení plastifikovaného materiálu způsobuje, že se stále větší podíl vibrační energie přeměňuje na teplo. Plastický materiál se taví a vlivem svařovacího tlaku teče mezi dvěma povrchy součástí. Jakmile je dosaženo vhodného sesazení součástí, ultrazvukové kmitání je zastaveno. Po ukončení přívodu ultrazvukové energie je nutná krátká ochlazovací fáze při ještě existujícím spojovacím tlaku, aby se předtím natavený materiál mohl zpevnit. Po ztuhnutí plastu jsou obě součásti spojeny dohromady.

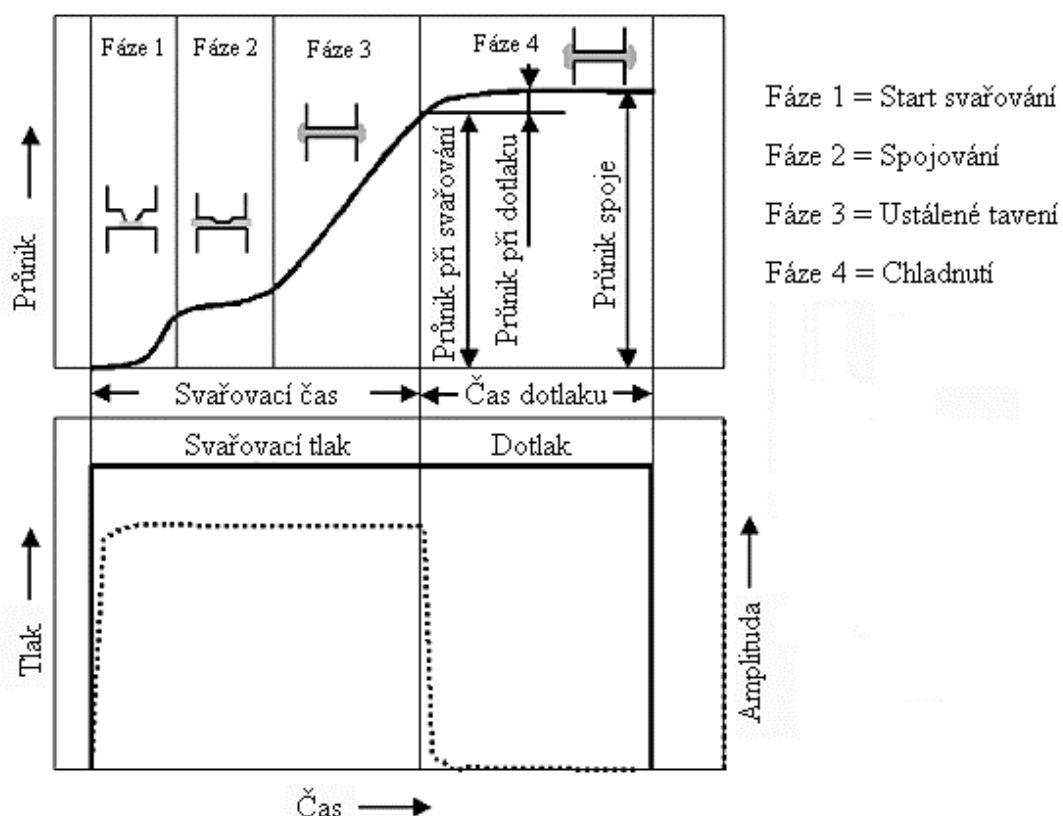
2.2. Svařovací cyklus [2]

Svařovací cyklus je schématicky zobrazen na obr. 2.1. Dva spojované termoplasty se nejprve umístí jeden na druhý do takzvaného lůžka. To je přípravek do kterého se obě součásti upnou, aby zamezil jejich pohybu či vzájemnému posuvu. Posléze je sonotroda navedena ke kontaktu s horním dílem. Při dosažení kontaktu začne na obě spojované součásti působit kontrolovaný tlak proti lůžku. Za stále trvajícího tlaku začne sonotroda vertikálně vibrovat. Dochází k přenosu ultrazvukové energie do oblasti spoje. Materiál se taví a teče v rozhraní spoje.



Obr. 2.1: Schéma svařovacího cyklu [3]

Po dosažení požadovaného natavení materiálu je přísun ultrazvukové energie zastaven. Svařovací čas je nastavován přímo nebo je řízen dosažením požadovaného rozměru svaru, tj. dosažení absolutního nebo relativního posunutí sonotrody. Zatímco roztavený plast chladne a tuhne je sevření součástí udržováno tak, aby došlo ke spojení. To je tzv. dotlak. Zlepšení pevnosti a neprodyšnosti svaru může být dosaženo použitím vyšší přitlačné síly než u fáze svařování. Aby se předešlo vnitřnímu pnutí ve svaru, může být během fáze dotlaku také přitlačný tlak postupně snižován. Jakmile dojde ke ztuhnutí spojených plastů, sevření povolí a sonotroda je navracena zpět do původní polohy. Obě součásti jsou v tomto okamžiku spojeny a z lůžka jsou vyjmuty jako jedna část. Průběh svařovacího tlaku a ultrazvukových kmitů při ultrazvukovém svařovacím procesu je zobrazen na obr. 2.2.



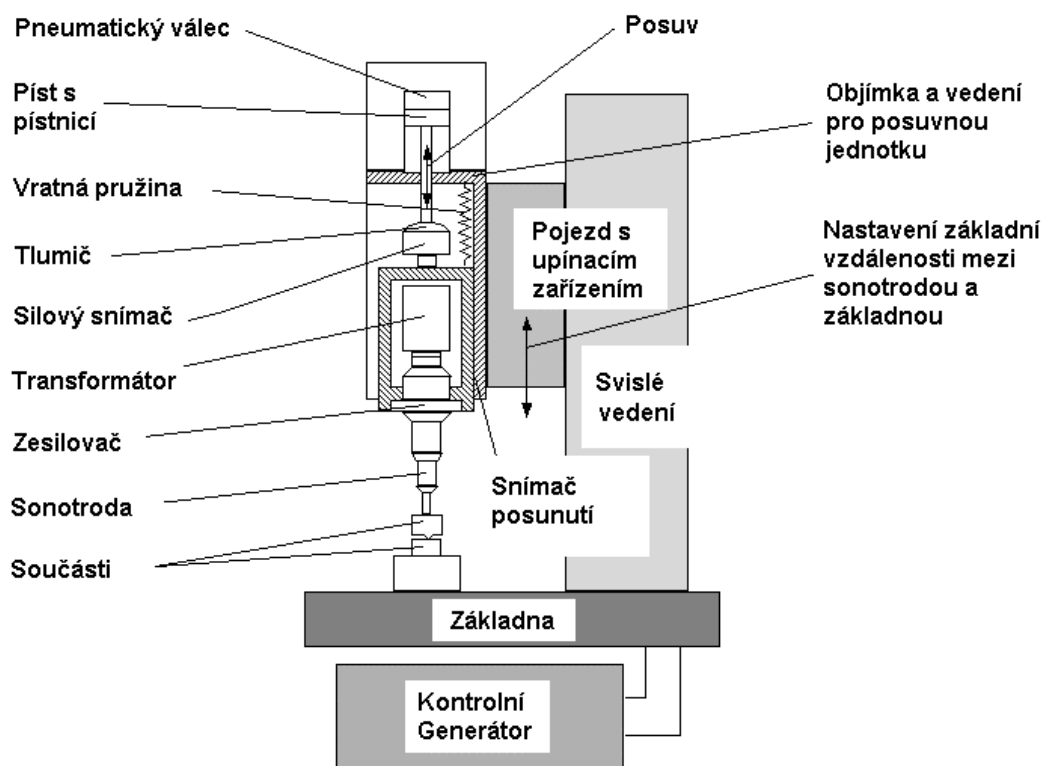
Obr. 2.2: Procesní diagram ultrazvukového svařovacího postupu použitého ke svaření spoje na tupo s usměrňovačem energie [4]

2.3. Prvky systému a funkce [1] [2]

Základní systém ultrazvukového svařování se skládá z těchto hlavních částí:

- Generátoru elektrické energie
- Transformátoru elektrických kmitů na kmity mechanické
- Zesilovače mechanických kmitů
- Sonotrody

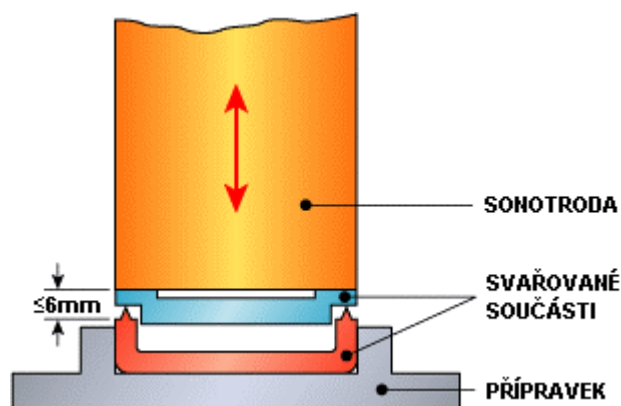
Sonotroda, zesilovač a transformátor tvoří kompaktní celek, který je uložen do posuvné části svařovacího stroje, která je ovládána pneumatickou jednotkou. Tímto přítlačným systémem je vyvozován svařovací tlak a dotlak. Schéma ultrazvukového svařovacího zařízení je na obr. 2.3. Generátor elektrické energie přeměňuje síťové napětí na elektrické impulsy, jejichž frekvence se pohybuje běžně od 15 kHz do 50 kHz. Výběr generátoru s určitou frekvencí záleží na dané aplikaci ultrazvuku. Vysokofrekvenční elektrická energie produkovaná generátorem je transformátorem přeměněna na podélné mechanické kmity. Amplituda těchto kmitů se pohybuje v rozsahu 15-60 μm . Akustická frekvence nižší jak 15 kHz (a vyšší amplituda kmitů) jsou někdy používány pro větší součásti nebo měkké materiály. Toto kmitání je zesíleno nebo zeslabeno zesilovačem. Velikost požadované amplitudy závisí na materiálu, typu použití a na práci, kterou je potřeba vykonat. Často je nezbytné měnit amplitudu kmitání jdoucí do sonotrody tak, aby byl žádaný výsledek vhodný ke konkrétnímu použití. Zesilovač toto zvýšení nebo snížení amplitudy umožňuje. V praxi se pak nejčastěji používá zesilovač se zesílením amplitudy v poměrech 2:1, 3:1 nebo 0,5:1. Kmity jsou zesilovačem dále přenášeny k sonotrodě. Sonotroda slouží k aplikování ultrazvukové energie na spojované součásti. V praxi jsou nejpoužívanější sonotrody vyrobené ze slitin hliníku. Pro náročné aplikace se však používají sonotrody z oceli nebo titanu s nitridovými povlaky. Při svařování v sériové výrobě bývá tvar sonotrody přizpůsoben součásti tak, aby docházelo k rovnoměrnému přenosu energie a zároveň umožňoval správné sesazení součástí. V závislosti na jejím tvaru, může sonotroda dále zvětšit amplitudu kmitání.



Obr. 2.3: Schéma ultrazvukového svařovacího zařízení [4]

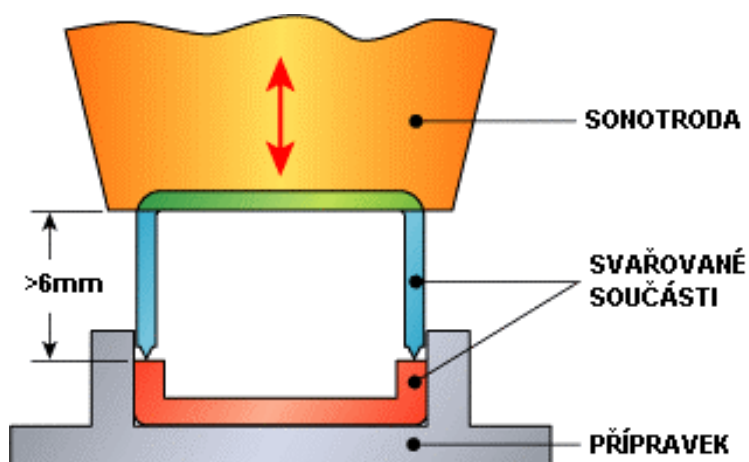
2.4. Svařování v blízkém a dalekém poli [1] [2]

V mnoha případech může být umístění spoje, pokud jde o oblast styku se sonotrodou, kritické, neboť ultrazvuková energie musí projít skrze materiál k dosažení požadované oblasti svařování. Svařování v blízkém a dalekém poli poukazuje na vzdálenost, na kterou je přenášena ultrazvuková energie z bodu styku se sonotrodou na rozhraní spoje. Když je vzdálenost mezi sonotrodou a styčnými plochami spoje 6 mm nebo méně, je to považováno za svařování v blízkém poli. Svařování v blízkém poli je zobrazeno na obr. 2.4. Když je vzdálenost větší než 6 mm, je to považováno za svařování v dalekém poli. Svařování v dalekém poli je zobrazeno na obr. 2.5. Kdykoli je to možné, mělo by být místo přiložení sonotrody umístěno co nejblíže k rozhraní svařovaných součástí.



Obr. 2.4: Svařování v blízkém poli [5]

Pokud musí být z konstrukčních důvodů místo spoje vzdáleno od přitlačné plochy sonotrody více než 6 mm a leží tudíž ve vzdáleném poli, je třeba zohlednit skutečnost, že poměrně velká část plastového dílu musí vést ultrazvukovou energii až k místu spoje. To znamená, že je pohlcováno větší množství ultrazvukové energie a je tedy při svařování v dalekém poli potřeba vyšší než normální amplituda, delší svařovací časy a vyšší svařovací tlak k dosažení blízkému poli srovnatelnému svaření. Ve vzdáleném poli je proto možné svařovat pouze dostatečně tuhé amorfnní plasty jako jsou PS, PMMA, SAN, ABS, PVC, a PC a také některé semikrystalické plasty jako např. POM nebo skelnými vlákny vyztužený PA a PET v případě příznivé geometrie dílu.



Obr. 2.5: Svařování v dalekém poli [5]



2.5. Svařitelnost, podmínky, vlivy [1]

Proces ultrazvukového svařování se hodí pro většinu termoplastů, nicméně je určitý počet s materiálem souvisejících faktorů, které by měli být vzaty v úvahu vzhledem k použitému procesu. Tyto charakteristické materiálové rysy zahrnují strukturu materiálu, charakteristiky toku taveniny, viskoelastické chování, navlhavost a přítomnost aditiv.

2.5.1. Struktura plastů [2]

Ultrazvukovým svařováním lze svařovat téměř všechny druhy termoplastů. Vlastnosti termoplastů jsou však značně rozdílné nejen vlivem chemického složení, nebo uspořádáním vlastní makromolekuly (lineární, rozvětvená), ale také vlivem nadmolekulární struktury. Jak jejich struktura, tak i jejich mechanické vlastnosti, mají zásadní vliv na svařitelnost a podmínky svařitelnosti. Na obr. 2.6 je příklad vlivu tvaru makromolekuly na konečné vlastnosti plastu. Termoplasty lze nezávisle na dalším způsobu členění rozdělit, dle jejich nadmolekulární struktury, do dvou skupin:

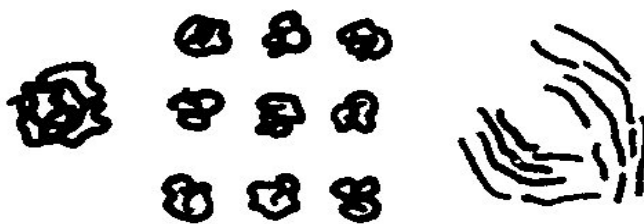
- Amorfní termoplasty
- Semikrystalické termoplasty

Typ polyetylénu a jeho vlastnosti	Schéma větvení makromolekul
HDPE – lineární, vysokohustotní polyetylén	
je tvrdší, tužší a nepatrně křehčí hustota $\rho = 940 \div 970 \text{ kg/m}^3$ má vyšší teplotu tání $T_m = 130 \text{ }^\circ\text{C} \div 135 \text{ }^\circ\text{C}$ má vyšší pevnost $\sigma_M = 20 \text{ MPa} \div 30 \text{ MPa}$ má vyšší modul pružnosti $E_t = 700 \text{ MPa} \div 1000 \text{ MPa}$	
LDPE – rozvětvený, nízkohustotní polyetylén	
je měkčí a ohebnější má lepší rázovou i vrubovou houževnatost při nízkých teplotách hustota $\rho = 915 \div 930 \text{ kg/m}^3$ má nižší teplotu tání $T_m = 105 \text{ }^\circ\text{C} \div 110 \text{ }^\circ\text{C}$ má nižší pevnost $\sigma_M = 8 \text{ MPa} \div 10 \text{ MPa}$ má nižší modul pružnosti $E_t = 100 \text{ MPa} \div 200 \text{ MPa}$	

Obr. 2.6: Vliv tvaru makromolekul na konečné vlastnosti plastu

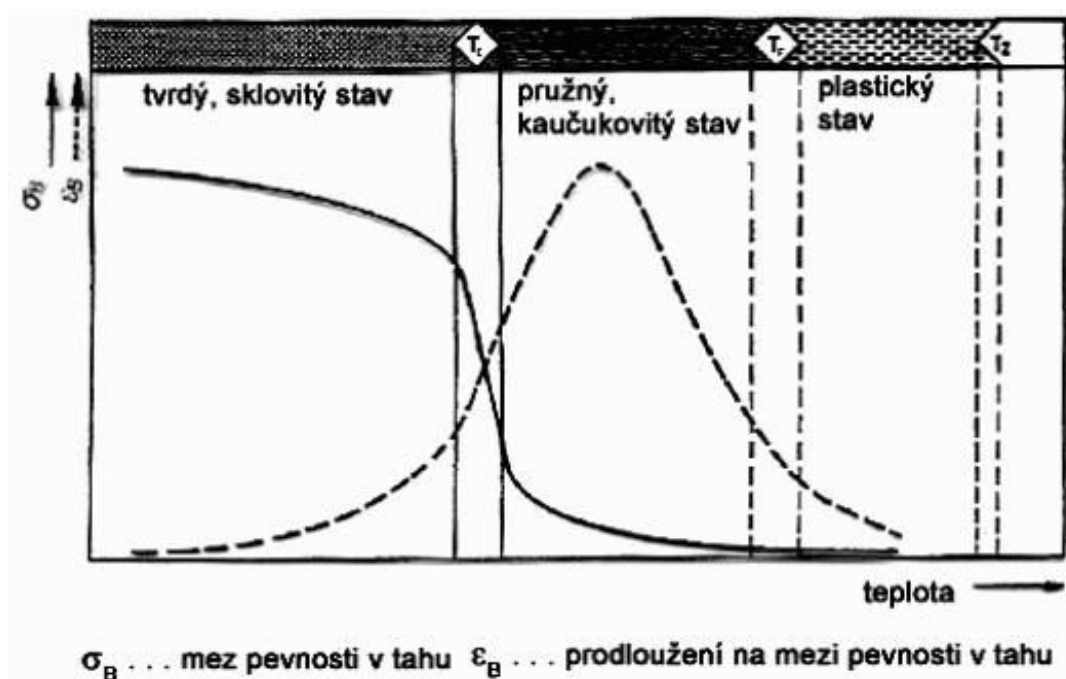
2.5.1.1. Amorfní termoplasty [1] [2] [6]

Amorfní termoplasty, zvláště ty které jsou za normálních teplot ve sklovitém stavu, jsou obzvláště vhodné pro ultrazvukové svařování. Makromolekuly amorfních termoplastů postrádají jakoukoliv uspořádanost. Snaží se zaujmout energeticky co možná nejvýhodnější polohu, proto se stáčí do klubíček, neboli globul. Nadmolekulární struktura amorfních termoplastů je zobrazena na obr. 2.7.



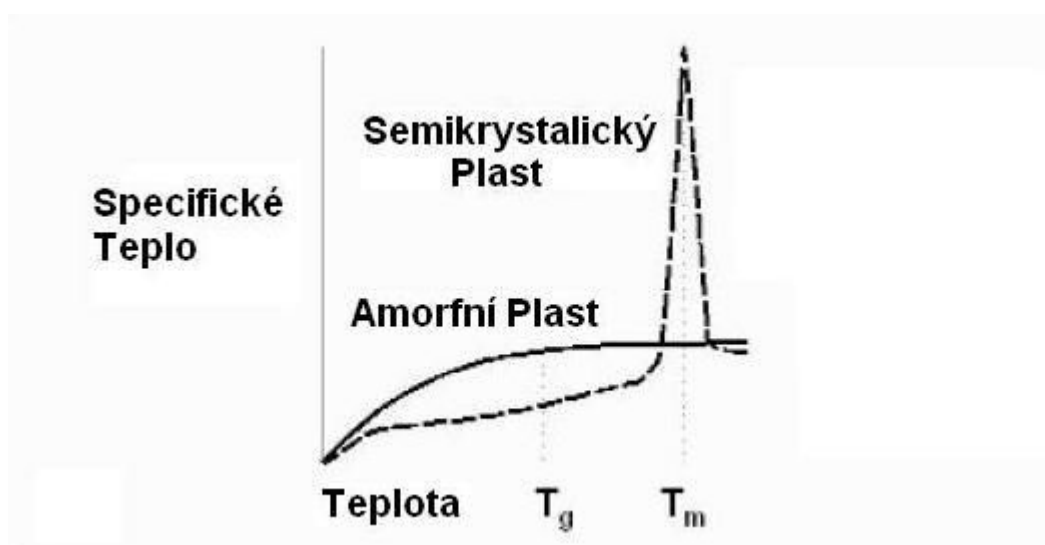
Obr. 2.7: Nadmolekulární struktura amorfních plastů
(vlevo globula, uprostřed uspořádání globul, vpravo svazek)

Toto náhodné molekulové uspořádání, díky nízké pohyblivosti makromolekul, samo o sobě umožňuje dobré vedení vibrační energie. Jejich svařitelnost je však ovlivněna především teplotou skelného přechodu T_g a tuhostí. Amorfní termoplasty jsou za normálních teplot tuhé, což umožňuje dobrý přenos vibrační energie i na velkou vzdálenost s jen minimálními ztrátami. Dobrý přenos kmitů sklovitého amorfního materiálu tak dovoluje úspěšné svařování jak v blízkém, tak i ve vzdáleném poli. Dále nemají amorfní termoplasty definovaný bod tavení. To znamená, že mají pozvolný teplotní přechod, vycházející ze sklovitého stavu přes teplotu skelného přechodu T_g , skrze širokou oblast měknutí, až posléze dosáhnou roztaveného stavu. To je patrné na obr. 2.8. Při chladnutí je pozorován obrácený postup, dovolující amorfnímu polymeru téct a rozptýlit se bez předčasného zatuhnutí. Spotřeba specifického tepla (viz. Obr. 2.9), a tím přiváděné ultrazvukové energie, jsou díky tomu malé. Tuhost a postupný teplotní přechod má za následek flexibilitu při návrhu a zpracování právě tak, jako nižší spotřebu energie.



Obr. 2.8: Průběh deformačních vlastností amorfního termoplastu v závislosti na teplotě

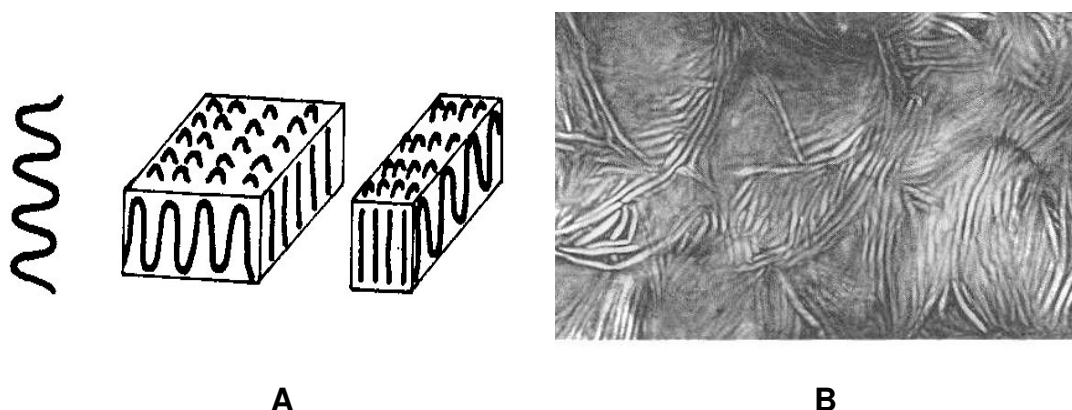
Ultrazvuková svařitelnost amorfních termoplastů se stává problematictější, je-li materiál pružnější. V krajním případě je v podstatě nemožné svařovat velmi pružný polymer jako termoplastický elastomer kvůli nadměrnému tlumení vibrací.



Obr. 2.9: Specifické teplo potřebné k roztavení plastu [7]

2.5.1.2. Semikrystalické termoplasty [1] [2] [6]

Semikrystalické polymery jsou za pomoci ultrazvukové energie obecně obtížněji svařitelné, než tuhé amorfními termoplasty. U semikrystalických plastů (plasty s určitým podílem krystalické oblasti vůči oblasti neuspořádané) je v krystalické oblasti základním stavebním útvarem lamela, skládající se z jednotlivých proužků, přičemž jeden proužek odpovídá jedné makromolekule. Vznikající lamely se mohou sdružovat do jednotlivých útvarů tzv. fibril, nebo deformovat do spirály a jejich radiálním skládáním se vytvářejí složitější krystalické útvary sférického tvaru, takzvané sférolity. Na obr. 2.10 a obr. 2.11 je zobrazena nadmolekulární struktura semikrystalických termoplastů.

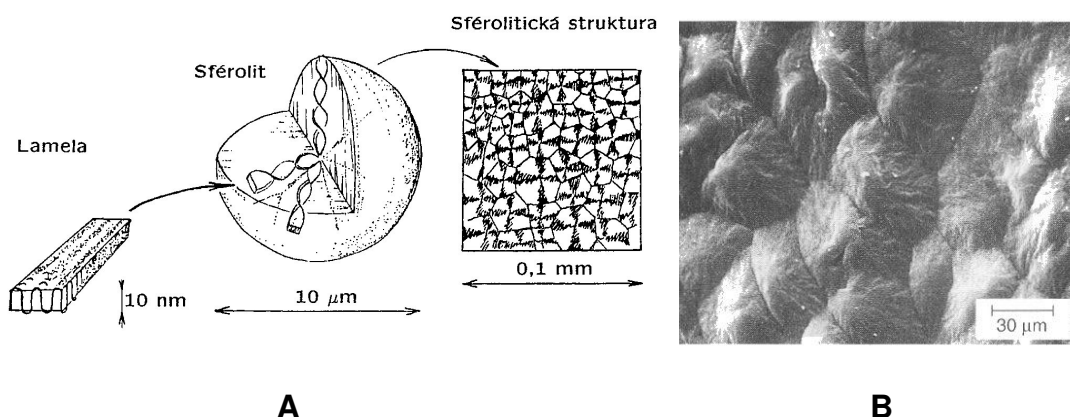


Obr. 2.10: Nadmolekulární struktura semikrystalických plastů

A - schéma lamel (vlevo proužek, uprostřed lamela, vpravo fibrila)

B - struktura

Tato jejich uspořádaná molekulová struktura pohlcuje vibrační energii, což ztěžuje přenos kmitů z kontaktního bodu sonotrody přes plast ke styčným plochám spoje svařovaných součástí. Semikrystalické polymery mají také za normálních teplot relativně nízkou tuhost. Následkem toho je nezbytné zvýšení energetické hladiny potřebné při svařování a zkrácení vzdálenosti mezi sonotrodou a plochou svařovaného rozhraní. Svařování ve vzdáleném poli požaduje nadměrný příkon kvůli ztrátám energie na delší vzdálenost a může mít za následek tavení součásti i mimo oblast spoje. Svařované součásti by měli být také velmi dobře podepřeny.

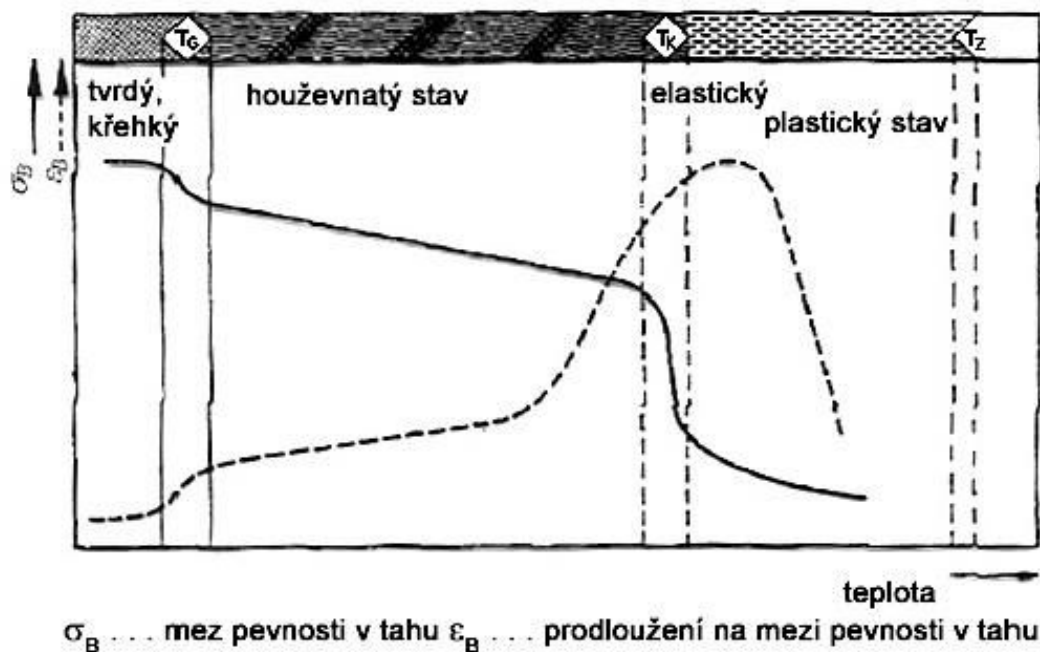


Obr. 2.11: Nadmolekulární struktura semikrystalických plastů

A - schéma a struktura sférolitů (vlevo schéma, vpravo struktura)

B - struktura

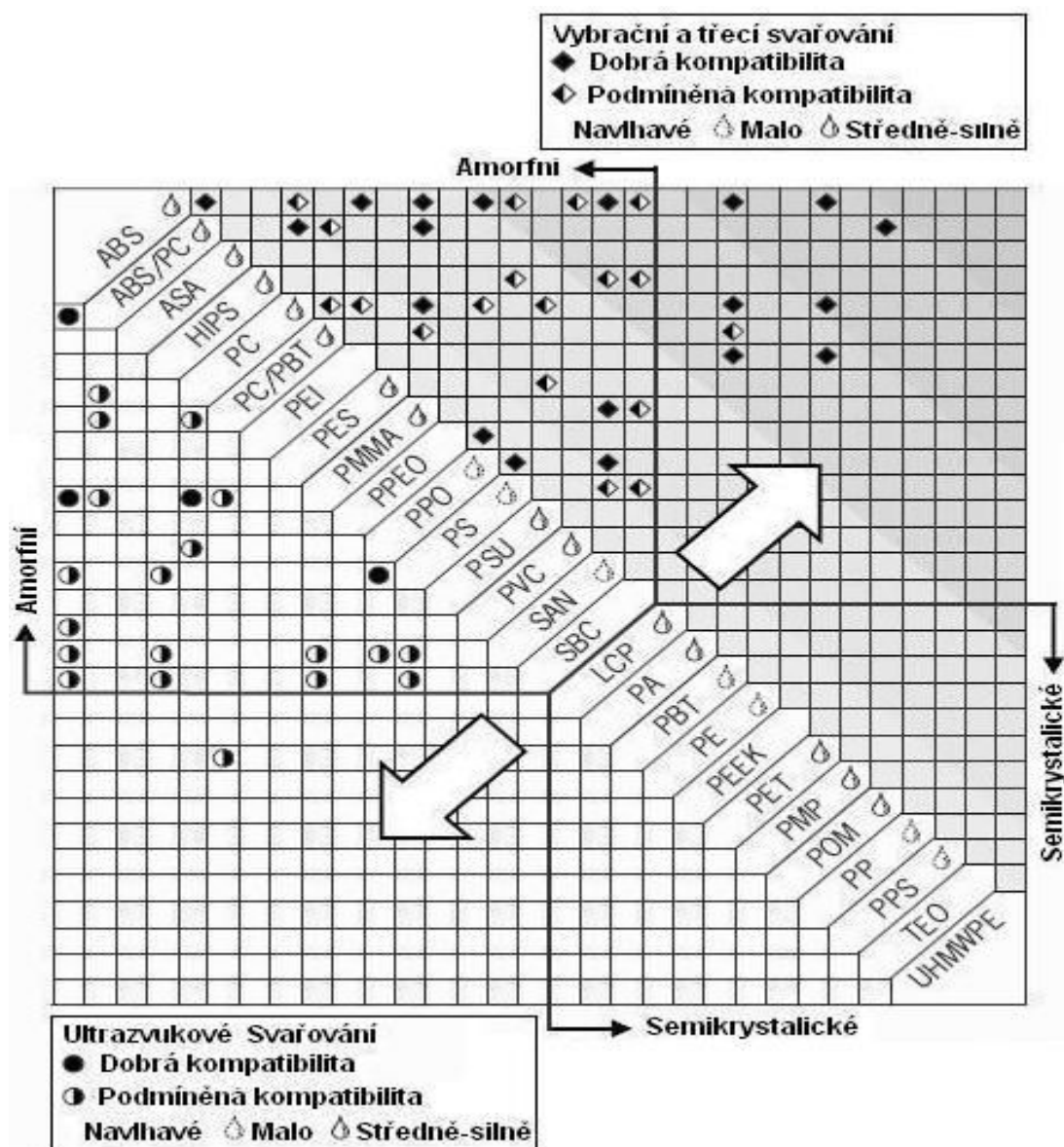
Nepodepřené části profilu, zvláště ty s nedostatečným zaoblením hran, by mohli prasknout nebo se zlomit během svařování v důsledku vysoké amplitudy vibrací. Dále mají semikrystalické polymery narozdíl od amorfních plastů výrazný bod tání. To je patrné na obr. 2.12. Je požadována vysoká úroveň tepelné energie (viz. Obr. 2.9), aby se rozpadla krystalická struktura před roztavením. To znamená, že semikrystalický plast zůstává pevný až dokud nedosáhne teploty tání, kdy nastane rychlý přechod na taveninu. Molekuly jsou v tomto okamžiku schopné tečení. Kvůli náhlé krystalizaci molekul však nastane ztuhnutí stejně tak rychle. Vyšší množství energie, potřebné k roztavení semikrystalického materiálu a velmi rychlé tuhnutí taveniny jsou tak dalšími důvody, proč jsou semikrystalické polymery hůře svařitelné, než polymery amorfní. Relativně malé rozmezí tavení a tuhnutí semikrystalického materiálu v kombinaci s potřebou dodatečného příkonu k překonání skupenského tepla tání tak vede ke špatné pevnosti svaru. Roztavený polymer má sklon tuhnout předčasně, dříve než se uskuteční významná míra molekulárního prolnutí mezi vrstvičkou taveniny a přilehlými povrchy součástí.



Obr. 2.12: Průběh deformačních vlastností semikrystalického termoplastu v závislosti na teplotě

2.5.2. Kompatibilita materiálů [2]

Ultrazvukovým svařováním lze také vzájemně spojovat některé různé druhy termoplastů. Pro takovéto spojení je nezbytné, aby byly tyto termoplasty chemicky kompatibilní. Nejsou-li plasty chemicky kompatibilní, tak se sice budou oba materiály tavit současně, ale nevznikne téměř žádné vzájemné spojení. Rozdílné termoplasty mohou být kompatibilní, jestliže se jejich teploty tání neliší více než o 14 až 22 °C a mají podobnou molekulovou strukturu. V praxi to znamená, že pro docílení optimálních výsledků svařování je třeba, aby díly, které se mají spojit, byly vyrobeny ze stejného druhu materiálu a ze stejného typu materiálu. To platí hlavně u semikrystalických plastů. U amorfních plastů existují v praxi zvláštní případy svařování odlišných druhů plastů s poměrně dobrými výsledky. Například lze poměrně úspěšně svařovat ABS – PMMA; ABS - PVC nebo PMMA - PC, protože jejich chemické vlastnosti jsou kompatibilní. Pokusy o svařování semikrystalických plastů s amorfními nevedly k použitelným výsledkům. Vzájemná kompatibilita při svařování je zobrazena na obr. 2.13.



Obr. 2.13: Vzájemná kompatibilita termoplastů při svařování ultrazvukem a při vibračním a třecím svařování [8]

2.5.3. Navlhavost plastů [1] [2] [6]

Navlhavost je tendence některých plastů pohlcovat vlhkost. Polymery jako například PA nebo PC jsou navlhavé, tj. pohlčují a zadržují vzdušnou vlhkost. V tab. 2.1 je přehled navlhavosti několika nejběžnějších plastů. Navlhavost negativně ovlivňuje svařitelnost. Jestliže jsou svařovány navlhle součásti, je potřeba delších svařovacích časů. Voda zadržovaná uvnitř materiálu se při dosažení bodu varu začne vařit a odpařovat. To způsobí zpěnění ve styčné ploše spoje a vznik porézního svaru, který zhoršuje

neprodyšnost spoje a vytváří špatný vzhled spojených součástí. Je také výrazně snížena pevnost spoje. Navlhavé součásti by proto měli být svařeny ihned po vstřikování. Jestliže to není možné a součásti jsou před svařováním uskladněny, nebo je s nimi jinak manipulováno, měli by být zataveny v polyethylenových sáčcích se sušidly. Součásti uložené bez ochrany proti vlhkosti musí být před svařováním sušeny.

Tab. 2.1: Navlhavost plastů

skupina	c_r	příklady
NENAVLHAVÉ	< 0,1 %	PE, PP, PS, PF4
MÁLO NAVLHAVÉ	0,1 ÷ 0,5 %	SB, ABS, SAN, PC
STŘEDNĚ NAVLHAVÉ	0,5 ÷ 2,0 %	POM, PMMA, PVC, PA11
SILNĚ NAVLHAVÉ	> 2 %	PA6, PA66, PUR

2.5.4. Vliv aditiv na svařitelnost

Téměř všechny výrobky z plastu obsahují jeden nebo více aditiv. Velká část používaných aditiv má v rámci běžně užívaného množství jen malý nebo žádný účinek na ultrazvukovou svařitelnost. V některých případech však může být ultrazvuková svařitelnost významně ovlivněna.

2.2.4.1. Maziva [1] [2]

Maziva jako vosky, stearan zinečnatý, kyselina stearová, stearan hlinitý nebo tučné estery jsou přidávány k polymerům ke zvýšení tekutosti taveniny při zpracování. Protože maziva obsažená v plastu nemohou být odstraněna a snižují součinitel tření mezi molekulami a tím zabraňují vzniku tepla u svařovaných součástí, mohou výrazně ztížit nebo dokonce překazit celý proces ultrazvukového svařování.

2.2.4.2. Separátory [1] [2] [6]

Separátory jsou obvykle rozprašovány na povrch dutiny formy a jsou používány pro usnadnění vyhození vyrobených součástí z dutiny formy snížením tření mezi výrobkem a stěnou dutiny formy. Naneštěstí činidla ulpívající na lisovaných dílech snižují povrchové tření ve styčných plochách spoje při svařování. Protože proces ultrazvukového svařování závisí i na povrchovém tření, může použití separátorů na formu zhoršit svařitelnost. Mimoto chemické znečištění polymeru v rozhraní spoje použitím separátorů, může zabránit utvoření požadovaného spojení. Některé separátory mohou být před svařováním odstraněny ze součástí použitím vhodných rozpouštědel.

2.2.4.3. Plniva [1] [2] [6]

Plnivo jako skelná vlákna, talek, uhlíková vlákna nebo křída jsou přidávány k polymerům ke změně jejich fyzikálních vlastností. Například skelná vlákna jsou přidávána do polymeru ke zlepšení jeho rozměrové stálosti a zlepšení mechanických vlastností. Plnivo jako skelná vlákna nebo talek mohou ve skutečnosti zlepšit svařitelnost termoplastu, protože zlepšují schopnost polymeru přenášet vibrační energii. To je důležité zvláště u semikrystalických plastů. Obsah skelných vláken mezi 10% a 20% může podstatně zlepšit přenosové vlastnosti polymeru, avšak přímý poměr mezi přidáním plniva a zlepšením svařitelnosti existuje jen uvnitř stanoveného kvantitativního rozsahu. Když úroveň převyšuje 10% až 20% , mohou nastat další problémy. Například je-li obsah plniva hotového dílu 30%, skutečný obsah v povrchové vrstvě ve spoji může být mnohem vyšší. Nahromadění plniva ve styčných plochách spoje může být tak vážné, že tam nezůstane dost polymeru, aby byl vytvořen přijatelný spoj. Jestliže množství plniv ve spoji překračuje 40%, může být ve spoji více materiálu nesvařitelného než toho svařitelného. To znamená, že se svařitelnost stává mnohem obtížnější. Obsah plniv nad 20% také může způsobovat opotřebovávání sonotrody a upínacího přípravku tak výrazně, že je potřeba speciální nástroj. Kvůli přítomnosti částecek v povrchu polymeru, lze používat jen sonotrodu ze

zušlechtěné oceli nebo z titanu pokrytého karbidy. Může být také zapotřebí ultrazvukové zařízení s vyšším výkonem pro zajištění dostatečného tepla vytvářeného ve spoji.

2.2.4.4. Retardéry hoření [1] [2]

Retardéry hoření jsou používány ke snížení hořlavosti plastu. Retardéry hoření jako antimon, bór, halogeny, dusík a fosfority jsou přidávány k polymerům k udržení teploty pod úrovní spalování, nebo k zabránění chemické reakce mezi polymerem a kyslíkem nebo dalšími hoření podporujícími plyny. Tímto mohou retardéry hoření přímo ovlivnit svařitelnost termoplastu snížením pevnosti hotového svaru. V praxi je často potřeba vysoce výkonné vybavení, operující s vyšší amplitudou než normálně používanou, aby mohly být součásti provařeny k dosažení dostačující pevnosti spoje.

2.2.4.5. Barviva [1] [2]

Kapalná nebo suchá barviva či pigmenty mají na svařitelnost velmi malý účinek, pokud ovšem není procento barviva v polymeru mimořádně vysoké. Bílé a černé součásti často potřebují více barviva než jiné barvy a mohou tudíž působit problémy.

2.2.4.6. Recyklát [1] [2] [6]

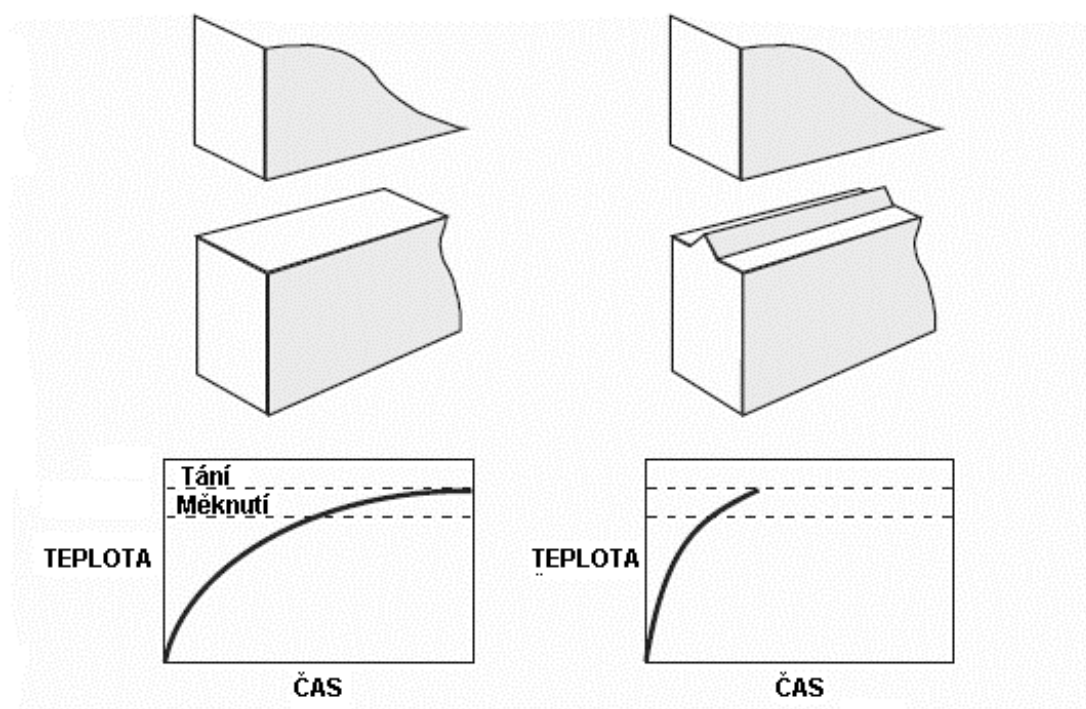
Recyklát je plastický materiál, který byl znovu zpracován a přidán k originálnímu plastu. Ultrazvukové svařování je jedna z mála metod zpracování, která dovoluje opětovné zpracování součástí z plastu, protože do polymeru není zavedena žádná cizí látka. Za předpokladu, že není procento recyklátu přílišné a plast nebyl degradovaný nebo znečištěný by měla být kvalita výsledného spoje ovlivněna jen minimálně. Při překročení hranice 20% nebo také při vícenásobném přetavení recyklátu, je však svařitelnost horší a zhorší se i očekávaná pevnost.

2.6. Požadavky na konstrukci spoje a součástí

Na konstrukci spoje a spojovaných součástí jsou kladeny velké nároky. Je potřeba vytvořit svar požadovaných parametrů a zároveň usnadnit a zjednodušit svařovací proces. V praxi je kladen důraz především na pevnost spoje. Často však bývá požadována i neprodyšnost spoje či dobrý vzhled na okraji rozhraní spoje. Důležité je také snadné a rychlé sesazení součástí. V první řadě je volen typ spoje. Ten se volí na základě požadovaných vlastností a možností součástí. Nedosahuje-li zvolený typ spoje některých požadovaných vlastností, musí být tyto vlastnosti dosaženy jinými konstrukčními prvky nebo použitým zařízením (přípravek, sonotroda).

2.6.1. Usměrňovač energie [1] [2]

Usměrňovač energie byl vyvinut tak, aby poskytoval přesný objem materiálu k natavení a mohla tak být dosažena dobrá pevnost spoje bez přílišných přetoků. Usměrňovač energie je trojúhelníkový výstupek utvořený na styčné ploše součástí. Ten se typicky táhne okolo celého spojovaného obvodu. Když je ultrazvuková energie přenášena skrze součást pod tlakem a po nějaký čas, energie koncentrovaná ve vrcholu usměrňovače (tj. tam kde se vrchol trojúhelníkového výstupku stýká s protilehlým povrchem) má za následek rychlé hromadění tepla, které způsobuje tání výstupku. Tavením materiálu se zvýší účinek tlumení. Se stoupajícím účinkem tlumení vlivem zahřátí molekul se mění více energie na teplo, což vede k dalšímu tavení. Celý proces způsobí, že v místě spoje dochází k rychlému natavení materiálu. Rozdíl v rychlosti tavení plastu mezi spojem s usměrňovačem energie a bez usměrňovače je znázorněna na obr. 2.14. Vzhledem k tekutosti taveniny a vyvozovanému svařovacímu tlaku je tavenina tlačena přes rozhraní spoje, přičemž se tvoří pouto s protilehlým povrchem. Jakmile tavenina dosáhne hranice spoje, je přívod energie zastaven a díl je pod uzavírací silou vystaven krátké fázi chlazení. Základní usměrňovač energie navržen pro amorfní polymery je pravoúhlý trojúhelník s úhlem 90 stupňů ve vrcholu a s úhly podstavy každým po 45 stupních. V případech, kdy toto dimenzování produkuje příliš mnoho taveniny, může být vrcholový úhel menší.



Obr. 2.14: Porovnání rychlosti tavení plastu ve spoji. (vlevo spoj na tupo, vpravo spoj na tupo s usměrňovačem energie) [7]

Pro PC, akrylové plasty a semikrystalické polymery je doporučován usměrňovač energie, který má tvar rovnostranného trojúhelníku s velikostí všech tří úhlů 60 stupňů. U mechanicky silně zatěžovaných dílů je však lépe se ostrému úhlu usměrňovače energie vyhnout. Výška usměrňovače energie se řídí podle požadavků a velikosti svařence. Může se pohybovat mezi 0,15 mm až 1,5 mm. Když je stěna dost tlustá, aby na ní byl vytvořen usměrňovač energie větší, než je jeho doporučená maximální velikost, měly by být místo něho použity dva menší rovnoběžné usměrňovače energie. Typického neprodyšného utěsnění je snazší dosáhnout u amorfních plastů než u semikrystalických plastů. Jestliže je požadováno hermetické utěsnění, je důležité, aby byly protilehlé povrchy dokonale rovné nebo sobě navzájem co nejvíce podobné. Spoj s usměrňovačem energie je vhodný pro amorfní polymery, protože jsou schopné toku taveniny a pozvolného tuhnutí. Není to však nejlepší konstrukce pro semikrystalické polymery. U semikrystalických polymerů materiál přemístěný z usměrňovače energie obvykle ztuhne, než tok taveniny může skrz rozhraní spoje vytvořit kvalitní spoj. To způsobuje

celkové snížení pevnosti a ztěžuje dosažení neprodyšného utěsnění. Nicméně jsou někdy jistá omezení předepsaná návrhem či velikostí součástí, která dělají použití usměrňovače energie na semikrystalických součástech nezbytným. V situacích, kde musí být používán usměrňovač energie u semikrystalických polymerů, by měl být větší a mít strmý úhel dávající ostrý vrchol. To mu umožní částečný pomalý chod do protilehlého povrchu během prvotního stádia svaru, čímž snižuje množství předčasného tuhnutí a degradaci způsobenou vystavením na vzduchu. Větší a ostřejší konstrukce usměrňovače energie zlepší pevnost a zvýší šanci na neprodyšné uzavření. V praxi se ukázalo, že větší a ostřejší konstrukce usměrňovače energie je také lepší pro práci s PC a akrylovými plasty, i když se oba materiály řadí mezi amorfní plasty. Spoj s usměrňovačem energie je přiveden k teplotě tání v mnohem kratším časovém intervalu a poskytuje mnohem pevnější svar než plochý tupý spoj.

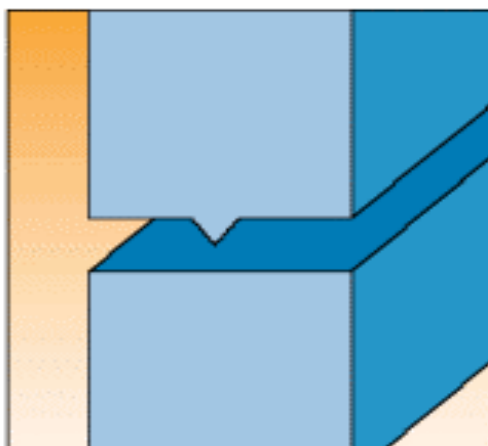
2.6.2. Typy spojů [2] [9]

Na konstrukci spoje jsou kladeny tři základní požadavky. Spoj by měl poskytovat rovnoměrnou plochu styku, malou počáteční plochu styku a způsob vzájemného sesazení součástí. Z hlediska principu fokusace ultrazvukové energie a tvaru rozhraní svaru rozlišujeme těchto šest základních typů spojů:

- Spoj na tupo
- Stupňový spoj
- Spoj pero-drážka
- Střížný spoj
- Šikmý spoj
- Bodový svar

2.6.2.1. Spoj na tupo [1] [2] [6]

Základní a nejběžnější konstrukce spoje je spoj na tupo s usměrňovačem energie. Spoj na tupo je na obr. 2.15. V rámci tří základních požadavků na konstrukci spoje vyhovuje spoj na tupo s usměrňovačem energie dvěma. Poskytuje rovnoměrnou a malou počáteční styčnou plochu. Sám o sobě však neposkytuje způsob vzájemného sesazení a slícování součástí, ani neposkytuje způsob jak ovládat přetok materiálu. Tyto požadavky musí být začleněny v konstrukci součástí. Jestliže to není možné, přípravek může být navržen k tomu, aby poskytoval požadované ustavení nezbytné k udržení vzájemného uspořádání součástí. Tato konstrukce spoje produkuje svar na celém profilu stěny s malými přetoky viditelnými na dokončeném spoji. Doporučovaná šířka základny usměrňovače energie je mezi jednou čtvrtinou až jednou pětinou tloušťky stěny.

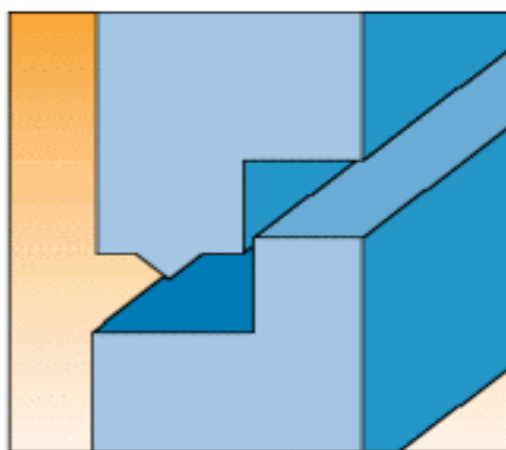


Obr. 2.15: Spoj na tupo [10]

2.6.2.2. Stupňový spoj [1] [2] [6]

Další varianta konstrukce spoje s usměrňovačem energie je stupňový spoj. Stupňový spoj je na obr. 2.16. Stejně jako tupý spoj s usměrňovačem energie vyhovuje dvěma ze základních požadavků na konstrukci spoje. Poskytuje rovnoměrnou plochu styku a zároveň malou počáteční plochu styku. Stupňový spoj ale navíc také poskytuje způsob vzájemného sesazení a srovnání součástí. Je také s výhodou používán, když je důležitý vzhled spojení. Použití stupňového spoje může odstranit přetok na vnějším okraji a zároveň vytvářít dostatečně silný spoj, protože materiál z usměrňovače

energie typicky vtéká do mezery mezi stěnami. Nicméně, tento spoj má jisté nároky na vstřikovací proces. Již při stavbě nástroje a při samotném vstřikování je třeba mít na zřeteli smrštění a dodatečné smrštění zpracovávané formovací směsí. Velmi důležité je, aby díly určené ke svaření se před svařováním nedřely a nepříčily se. Usměrňovač energie je rozměrově identický s používaným usměrňovačem energie u spoje na tupo. Doporučovaná výše a šíře výstupku je jedna třetina z tloušťky stěny. Šířka mezery mezi stěnami by měla být 0,05 mm až 0,1 mm, aby bylo zajištěno, že se nevyskytne žádná překážka v toku taveniny. Pro vzhledové účely je doporučováno ponechat na vzhledové straně spojovaných součástí nepatrnou mezeru. To se dělá aby nebyly na první pohled patrné nedostatky jako drobná nesouosost součástí nebo nerovnoběžnost stěn.

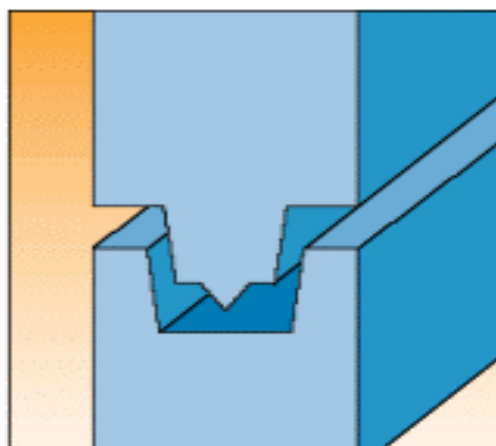


Obr. 2.16: Stupňový spoj [10]

2.6.2.3. Spoj pero-drážka [1] [2] [6]

Spoj pero-drážka je další variantou spoje s usměrňovačem energie. Spoj pero-drážka je na obr. 2.17. Stejně jako stupňový spoj splňuje tři požadavky na design spoje. Poskytuje rovnoměrnou plochu styku, malou počáteční plochu styku díky usměrňovači energie a způsob vzájemného sesazení a slícování součástí. Rovněž zabraňuje vnitřním i vnějším přetokům, protože přetoky jsou zachyceny na obou stranách styčné plochy. Spoj pero-drážka je v první řadě užíván pro aplikace, kde je důležité samoustavení součástí a prevence proti přetokům. Teoreticky jde o

nejideálnější spoj. Zaručuje nejvyšší možnou pevnost a jistotu nepropustného svaru. Toto spojení se ale v praxi málo používá, neboť klade vysoké nároky na vstřikovací proces. Je zde také riziko vzpříčení, a proto je použití omezeno na díly, u kterých jsou dobře známy tolerance, smrštění a dodatečné smrštění. Usměrňovač energie je opět rozměrově identický s usměrňovačem používaným u tupého spoje. Výška a šířka výstupku je doporučena jedna třetina tloušťky stěny. Mezera mezi stěnami by měla být zachována na každé straně výstupku k zabránění vzájemného přesahu a poskytnutí prostoru pro roztavený materiál. Jako u vícestupňového spoje je vhodná ze vzhledových důvodů malá mezera ve spojení hotových součástí.

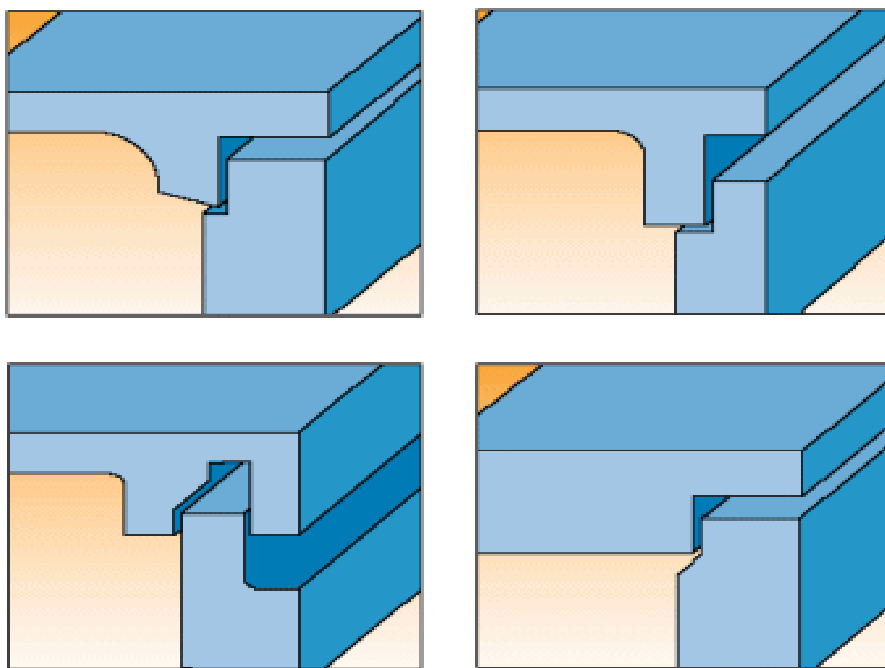


Obr. 2.17: Spoj pero-drážka [10]

2.6.2.4. Střížný spoj [1] [2] [6]

Tento druh spojení se uplatní zvláště u svařování semikrystalických termoplastů, protože mají pevně stanovenou teplotu tavení a prakticky naráz přecházejí z pevného do termoplastického stavu. Nicméně, i u amorfních plastů se tento druh spoje může uplatnit, zejména tam, kde je třeba docílit těsného a vysoce pevného spojení. Střížný spoj vyžaduje, aby byl na součásti konstruovaný určitý přesah. Svařování je dokončeno při prvním roztavení styčných ploch. Protože se roztavené součásti zároveň zasouvají do sebe, pokračuje tavení s kontrolovaným přesahem podél svislých stěn. Několik variant střížného spoje je zobrazeno na obr. 2.18. U tohoto typu spoje může být použita přetoková „past“, což je prostor na pojmnutí materiálu

vytěsněného ze svaru. Působení tření dvou vzájemně se posouvajících roztavených povrchů v rozhraní svaru odstraňuje netěsnosti a dutiny stejně jako vystavení vzduchu, předčasné tuhnutí a možnou oxidační degradaci. Toto vzájemné rozetření taveniny vytváří silný strukturální svar. U svařování se střížným spojem je velmi důležité podepření pevnou boční stěnou k zabránění odchýlení součástí během svařování. Je potřeba, aby stěny součástí byly podepřeny až k rozhraní spoje přípravkem, který bude přizpůsoben tvaru součástí.

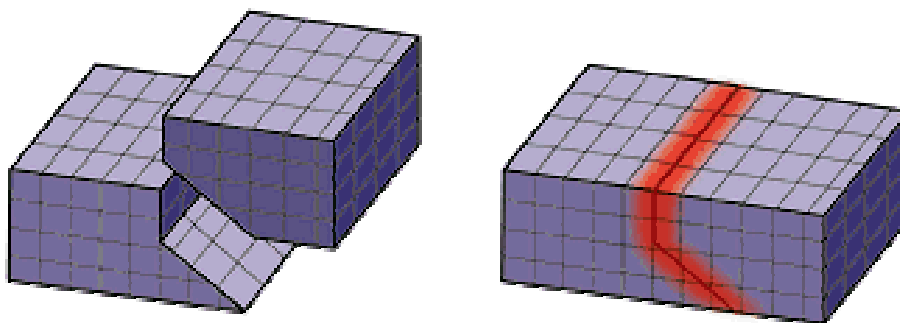


Obr. 2.18: Konstrukční varianty střížného spoje [10]

Navíc by mělo být snadnější vyjmutí součástí z přípravku, přípravek by měl být sám o sobě dělený, aby se dal otevřít a zase zavřít. Střížný spoj splňuje tři požadavky na návrh spoje. Zavedení horní části do osazení na části druhé poskytne způsob sesazení součástí před svařováním. Vhodně navržený a vylišovaný díl zaručí rovnoměrnou plochu styku a malá počáteční plocha styku mezi součástmi je daná přesahem daných průměrů. Používaný střížný spoj u semikrystalických součástí by neměl být větší než 90 mm v průměru. U amorfních plastů může být větší.

2.6.2.5. Šikmý spoj [1]

Šikmý spoj není obvykle používán kvůli vysokým nárokům na souosost a rozměrové tolerance dílů. Tento spoj je však velmi doporučován na spojování malých kruhových nebo oválných dílů v případech, kdy malá tloušťka stěny nedovoluje použití střížného spoje. Šikmý spoj je zobrazen na obr. 2.19. V rámci tří základních požadavků na konstrukci spoje vyhovuje šikmý spoj dvěma. Poskytuje rovnoměrnou styčnou plochu a sám o sobě umožňuje způsob vzájemného sesazení a slícování součástí. Neposkytuje však malou počáteční plochu styku. Nedochozí tak k potřebné fokusaci ultrazvukové energie a svařovací teplo se v rozhraní spoje vytváří především třením protilehlých povrchů. Díky tomu je pro svařování potřeba velkého množství energie a může tak docházet k tavení plastu i mimo oblast spoje. Šikmý spoj vyžaduje aby úhly svarového rozhraní u obou dvou součástí byli 30 až 60 stupňů a vzájemně se nelišili o více než jeden stupeň. Je-li tloušťka stěny 0,63 mm nebo méně, měl by být použit úhel 60°. Jestliže je tloušťka stěny 1,52 mm nebo více, měl by být použit úhel 30°. Úhly mezi 30 a 60 stupni jsou doporučené pro tloušťku stěny mezi 0,63 a 1,52 mm.

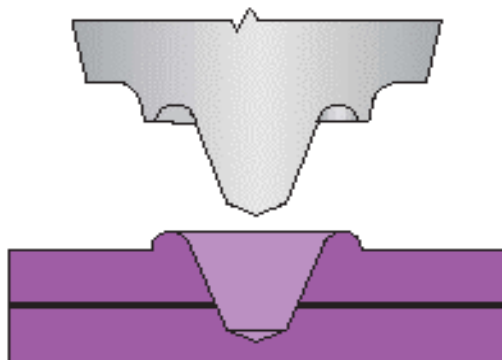


Obr. 2.19: Šikmý spoj (vlevo před svařením, vpravo po svaření) [11]

2.6.2.6. Bodový svar [9]

Při bodovém svařování leží svařované díly plošně na sobě bez připravených spojových míst a energetického usměrňovače. K fokusaci energie slouží špička sonotrody. Ta pronikne horní deskou až do spodního dílu a plastifikuje plast v dělicí spáře. Materiál plastifikovaný sonotrodou se

vytěsňuje do rozhraní mezi deskami a směrem nahoru, kde se formuje nákrůžkem na sonotrodě. Princip utvoření bodového svaru je zobrazen na obr. 2.20. Proces bodového svařování se velmi osvědčil pro spojování velkoplošných dílů tvářených různými způsoby za tepla. Je vhodné pro svařování materiálů s malou vzájemnou svařitelností, neboť vtlačení sonotrody skrze desky vzniká po ztuhnutí plastů i tvarový spoj.



Obr. 2.20: Bodové svařování [10]

3.1. Experiment a cíl diplomové práce

Ultrazvukové svařování se plně osvědčilo v nejrozmanitějších odvětvích průmyslu. Vlivem vysoké rychlosti procesu a reprodukovatelnosti svařovacích výsledků se tato technika prosadila ve velkosériové výrobě automobilů, elektrotechniky, lékařské techniky a v řadě dalších. Na dobré výsledky svařování s ohledem na pevnost, těsnost a optický vzhled má vliv nejen volba materiálu, technologické parametry výrobního procesu či správné konstrukční řešení svařovaných dílů, ale i správná volba parametrů svařovacího procesu. Cílem tohoto experimentu proto bylo zjistit vliv vybraných technologických parametrů ultrazvukového svařovacího procesu na pevnost, rozměry a vzhled svarového spoje.

3.2. Volba materiálu

Pro dané měření byl vybrán materiál Bayblend T65. Tento materiál byl vybrán pro své široké uplatnění. V automobilovém průmyslu se používá například na výrobu přístrojových desek, ventilačních systémů, středových konzol nebo krytů reproduktorů. a elektronickém průmyslu. Z materiálu Bayblend T65 byl například vyroben rám středové konzoly pro vůz Ford Mondeo viz. obr. 3.1, nebo přístrojová deska pro vůz Volkswagen Sharan viz. obr. 3.2.



Obr. 3.1: Rám středové konzoly vozu Ford Mondeo [12]



Obr. 3.2: Přístrojová deska vozu Volkswagen Sharan [13]

3.2.1. Charakteristika materiálu

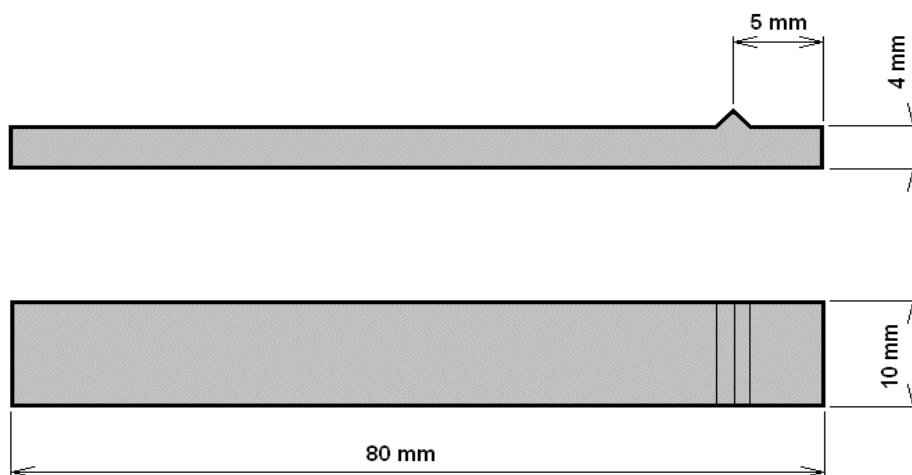
Bayblend T65 je směs amorfních termoplastických polymerů založená na polykarbonátu (PC) a akrylonitrilu butadienu styrenu (ABS) spojující výhody obou těchto termoplastů. Je znám svojí ideální kombinací houževnatosti, tuhosti a tekutosti taveniny. Má vysokou rázovou a vrubovou houževnatost a to v široké škále teplot. Vyznačuje se také vysokou rozměrovou stabilitou, vysokou teplotní odolností a vysokou odolností proti povětrnostním vlivům. Vybrané vlastnosti jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1: Vybrané vlastnosti plastu Bayblend T65

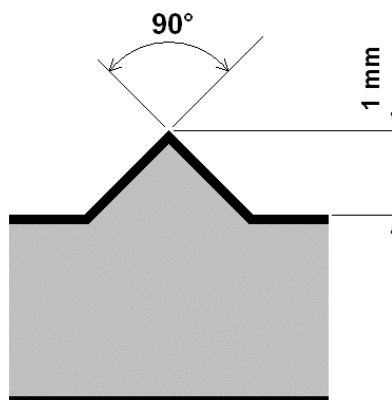
Vybrané vlastnosti	Testovací podmínky	Jednotky	Hodnota	Norma
Hustota		kg/m ³	1130	ISO 1183
Index toku taveniny	260 °C; 5kg	cm ³ /10min	12	ISO 1133
Vrubová houževnatost IZOD	23 °C	kJ/m ²	45	ISO 180-1A
Vrubová houževnatost IZOD	-30 °C	kJ/m ²	41	ISO 180-1A
Modul pružnosti v tahu	1mm/min	MPa	2200	ISO 127-1,-2
Mez kluzu v tahu	50mm/min	MPa	52	ISO 127-1,-2
Prodloužení na mezi kluzu	50mm/min	%	4,2	ISO 127-1,-2
Napětí v tahu při přetržení	50mm/min	MPa	45	ISO 127-1,-2
Prodloužení při přetržení	50mm/min	%	>50	ISO 127-1,-2
Teplota měknutí dle Vicata	50N; 120 °C/h	°C	120	ISO 306

3.3. Příprava zkušebních vzorků

Konstrukce a rozměry zkušebních vzorků byli voleny tak, aby bylo možné měřit, jednak pevnost svaru na trhačím stroji a zároveň posoudit i jiné parametry svaru, jako jsou rozměry a vzhled. Zvolená konstrukce byla také ovlivněna dostupností zařízení či nástrojů a náklady na jejich úpravu dle potřeb měření. Zkušební tělesa jsou vyrobena svažením dvou tyček o rozměrech 80 x 10 x 4 mm, přičemž jedna z tyček je opatřena usměrňovačem energie. Tyčky jsou vyrobeny vstřikováním. Rozměry tyčky a umístění usměrňovače energie jsou na obr. 3.3. Rozměry použitého usměrňovače energie jsou na obr. 3.4.



Obr. 3.3: Rozměry tyčky a umístění energetického usměrňovače



Obr. 3.4: Rozměry usměrňovače energie

3.3.1. Výroba tyček

Zkušební tyčky byly vyrobeny vstřikováním na vstřikovacím lisu ENGEL ES 25/50. Byla použita čtyřnásobná vstřikovací forma. To znamená, že během jednoho vstřikovacího cyklu byly vyrobeny dva páry zkušebních tělísek. Pro temperaci formy byl použit temperační agregát TA3. Vzhledem k tomu, že byl zvolený materiál Bayblend T65 mírně navlhavý, bylo dle doporučení výrobce materiálu nutné granulát před vstřikováním sušit po dobu čtyř hodin při teplotě 110 °C. Po vyjmutí z formy byla z tyček odstraněna vtoková soustava a místa vtoků byla začištěna. Před svařováním byly zkušební tyčky 24 hodin kondicionovány na teplotu 23 °C a vlhkost 50%. Technologické parametry vstřikování byly zvoleny dle doporučení výrobce plastu a jsou uvedeny v tab. 3.2.

Tab. 3.2: Vybrané technologické parametry vstřikování

Teplota 1. pásma	190 °C
Teplota 2. pásma (střed)	170 °C
Teplota 3. pásma (násipka)	150 °C
Teplota formy	90 °C
Průměr trysky	3 mm
Průměr dýzy	5 mm
Čas vstřikování	10 s
Čas chlazení	25 s
Manipulační čas	17 s
Celkový čas cyklu	60 s
Vstřikovací tlak	6 MPa

3.3.1.1. Zařízení použité na výrobu tyček

Vstřikovací lis ENGEL ES 25/50

- šnekový vstřikovací agregát
- čtyřsloupkové vedení
- přímé hydraulické uzavírání
- poloautomatický provoz



Obr. 3.5: ENGEL ES 25/50

Temperační agregát TA3

- Zařízení k temperaci vstřikovacích forem vodou do 95 °C.
- Vytápění vany agregátu topným tělesem o výkonu 3 kW.
- Chlazení šnekem s oběhem studené vody.
- Regulace topení pomocí regulátoru s PID řízením.
- Výkon čerpadla 60 l/min
- Objem nádrže 5 l.



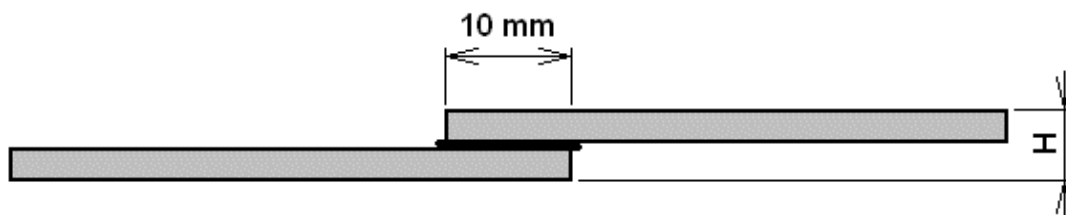
Obr. 3.6: TA3

Vstřikovací forma

Z ekonomických důvodů byla použita dostupná dvoudesková čtyřnásobná forma na výrobu zkušebních tělísek pro měření rázové houževnatosti. Pro účely této práce však byla tato forma upravena tak, aby dvě ze čtyř vystříknutých těles měla energetický usměrňovač a tvořila tak dva páry zkušebních tyček pro svařování.

3.3.2. Svařování zkušebních vzorků

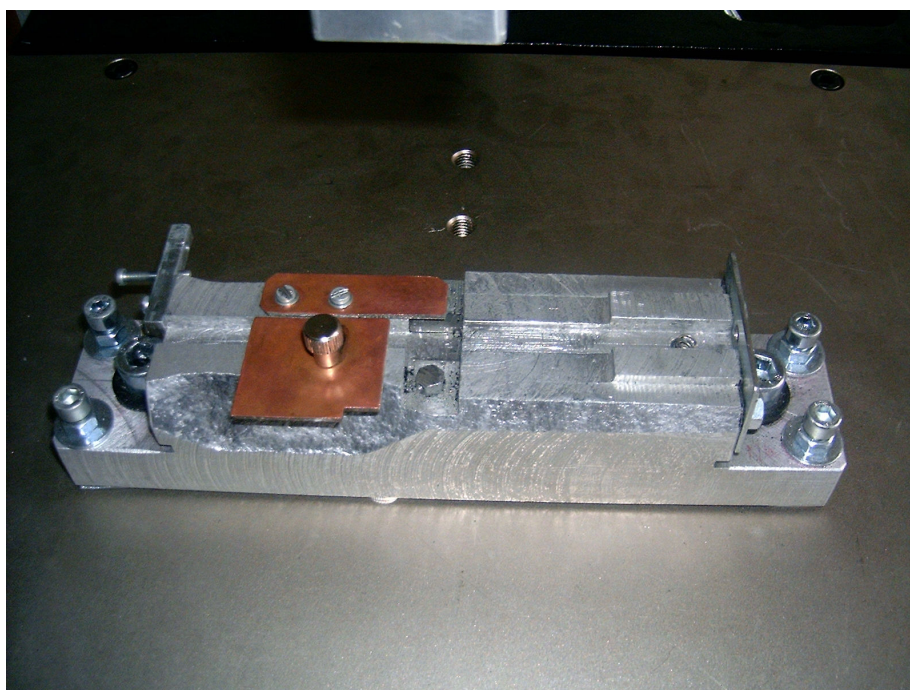
Zkušební tělesa se skládají ze dvou zkušebních tyček svařených technologií ultrazvukového svařování za určitých technologických parametrů. Zkušební tyčky byly svařovány na ultrazvukové svářečce od firmy DUKANE. Parametry sesazení svařovaných tyček jsou zobrazeny na obr. 3.7.



Obr. 3.7: Parametry sesazení a svaření tyček

Požadované sesazení tyček bylo zajištěno přípravkem na obr. 3.8. V praxi je svařování řízeno dvěma způsoby. Buď je přímo nastavován svařovací čas, nebo je svařováno dle vzdálenosti. Při svařování dle vzdálenosti je přísun ultrazvukové energie zastaven při dosažení požadované vzdálenosti

sonotrody. Vzdálenost může být měřena od horní polohy sonotrody (absolutní), nebo od místa kontaktu sonotrody se svařovanou součástí (relativní). Pro účely experimentálního měření bylo zvoleno svařování dle absolutní vzdálenosti sonotrody. Požadovaný rozměr svařených součástí se skládal z tloušťky obou tyček a svařovací mezery h . Velikost mezery byla vzhledem ke konstrukci zkušební vzorku zvolena tak, aby došlo k rovnoměrnému roztečení taveniny v celé ploše rozhraní spoje a jen k mírným přetokům. Požadovaný rozměr svařených součástí, označený na obr. 3.7, byl proto pro řízení svařovacího procesu zvolen $H = 8,1$ mm.



Obr. 3.8: Přípravek použitý při svařování

K zjištění neoptimálnějších hodnot technologických parametrů svařování, bylo v rámci rozsahu dostupných doporučovaných hodnot pro daný typ materiálu zhotoveno několik svarů. Na základě výsledků naměřených u těchto svarů, byly jako základní technologické parametry zvoleny hodnoty zobrazené v tab. 3.3. Pro zjištění vlivu daných technologických parametrů na kvalitu svaru byl v daném rozsahu vždy měněn jen jeden z nich. Pro každou jednu kombinaci technologických parametrů bylo zhotoveno deset zkušebních vzorků, které byly dále měřeny a zkoušeny tahem.

Tab. 3.3: Zvolené základní technologické parametry

Svařovací tlak	$p = 1 \text{ kPa}$
Maximální svařovací čas	$t_m = 7 \text{ s}$
Dotlak	$p_d = 200 \text{ kPa}$
Čas dotlaku	$t_d = 8 \text{ s}$
Amplituda	$Y = 45 \text{ } \mu\text{m}$
Mezera mezi součástmi	$h = 1 \text{ mm}$

3.3.2.1. Zařízení použité při svařování

Pro svařování byl použit přitlačný systém MODEL 220 od firmy DUKANE vybavený výkonným piezoelektrickým měničem MagnumTM s frekvencí ultrazvukových kmitů 20 kHz. Dále byl vybaven titanovým zesilovačem mechanických kmitů a sonotrodou z hliníkové slitiny s rovnou styčnou plochou. K přitlačnému systému byl připojen dynamický ovladač DPC IV Plus což je generátor vysokofrekvenční elektrické energie s integrovaným systémem řízení procesů. Zařízení je zobrazeno na obr. 3.9.



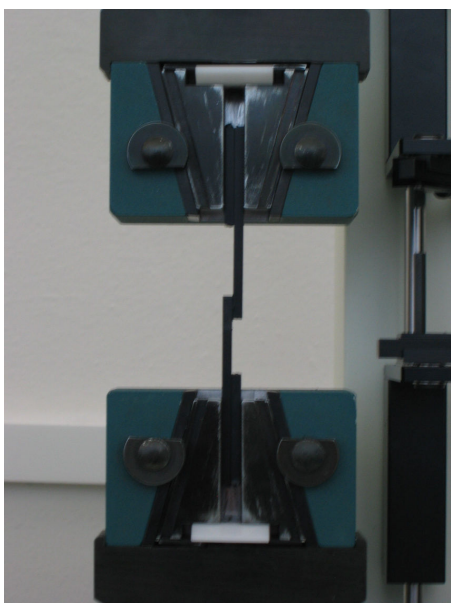
Obr. 3.9: Použité svařovací zařízení

3.4. Měření rozměru zkušebního vzorku v místě svaru

Protože bylo použito svařování dle vzdálenosti a absolutní vzdálenost sonotrody byla nastavena tak, že byl svařovací proces zastaven při dosažení rozměru svařence $H = 8,1$ mm viz. obr. 3.7, byli zkušební vzorky po svaření měřeny. Rozměr svařených součástí H byl měřen v oblasti umístění usměrňovače energie. Díky naměřeným odchylkám od dané hodnoty tak bylo možné posoudit vliv technologických parametrů na výsledné rozměry svařovaných součástí. Velikost zhotovených zkušebních vzorků H byla měřena digitálním posuvným měřítkem s přesností 0,01 mm.

3.5. Měření pevnosti svaru

Pevnost svaru byla měřena na trhacím stroji Hounsfield H 10 KT. Zkušební vzorek byl upnut do čelistí tak, aby zatížení působilo v rovině svaru. Upnutí zkušebního vzorku je na obr. 3.10. Rychlost zkoušení byla pro všechna měření zvolena $v = 50$ mm/min. Vzhledem k tomu, že vytvořený svar nebyl homogenní a za určitých technologických podmínek docházelo v některých místech svaru jen ke studeným spojům, nebo nebylo vytvořeno dostatečné množství taveniny k zaplnění celého rozhraní spoje, nebylo možné určit plochu svaru.



Obr. 3.10: Upnutí zkušebního vzorku



Obr. 3.11: Zkušební vzorek po porušení

Nehomogenita svaru je patrná na rozhraní spoje po destrukci viz. obr. 3.11. Díky tomu byla výsledkem této zkoušky pouze maximální tahová síla F_t , naměřená při destrukci zkušebního vzorku. Naměřené hodnoty tak slouží pouze k porovnání pevnosti svarů zhotovených za různých technologických parametrů svařování.

3.5.1. Použité zařízení

Pro experimentální měření byl použit Trhací stroj Hounsfield H 10 KT. Byl připojen na počítač vybavený softwarem QMAT. Při měření byla použita siloměrná hlava 10kN. Použitý trhací stroj je na obr. 3.12.



Obr. 3.12: Trhací stroj Hounsfield H 10 KT

4. Naměřené výsledky a jejich vyhodnocení

Pevnost svaru

V tabulkách 4.1; 4.3; 4.5; 4.7; 4.9 jsou uvedeny hodnoty maximální tahové síly F_t naměřené při destrukci zkušebních vzorků na trhacím stroji a jejich střední aritmetická hodnota vypočtená vždy pro jeden daný technologický parametr svařovacího procesu. U všech středních aritmetických hodnot F_t jsou také uvedeny jejich směrodatné odchylky. Pro grafické zhodnocení vlivu daného parametru svařovacího procesu na pevnost výsledného svaru byl použit dvojosý bodový graf (obr. 4.1; 4.3; 4.5; 4.7; 4.9).

Rozměr zkušebního vzorku v místě svaru

V tabulkách 4.2; 4.4; 4.6; 4.8; 4.10 jsou uvedeny naměřené hodnoty výsledného rozměru každého zhotoveného svaru H viz obr 3.3.2.1. a jejich střední aritmetická hodnota vypočtená vždy pro jeden daný technologický parametr svařovacího procesu. U všech středních aritmetických hodnot H jsou také uvedeny jejich směrodatné odchylky. Pro grafické zhodnocení vlivu daného parametru svařovacího procesu na výsledný rozměr zhotoveného svaru byl použit dvojosý bodový graf (obr. 4.2; 4.4; 4.6; 4.8; 4.10).

Pro názornost jsou body ve všech grafech proloženy polynomickou spojnici trendů s hodnotou její spolehlivosti R^2 .

4.1. Vliv velikosti svařovacího tlaku na pevnost a rozměr svarového spoje

Pro zjištění vlivu velikosti svařovacího tlaku na pevnost a rozměr svarového spoje byly zkušební vzorky svařovány za těchto technologických parametrů:

maximální svařovací čas	$t_m = 7 \text{ s}$
velikost dotlaku	$p_d = 200 \text{ kPa}$
čas dotlaku	$t_d = 8 \text{ s}$
amplituda	$Y = 45 \text{ } \mu\text{m}$
mezera mezi součástmi	$h = 1 \text{ mm}$

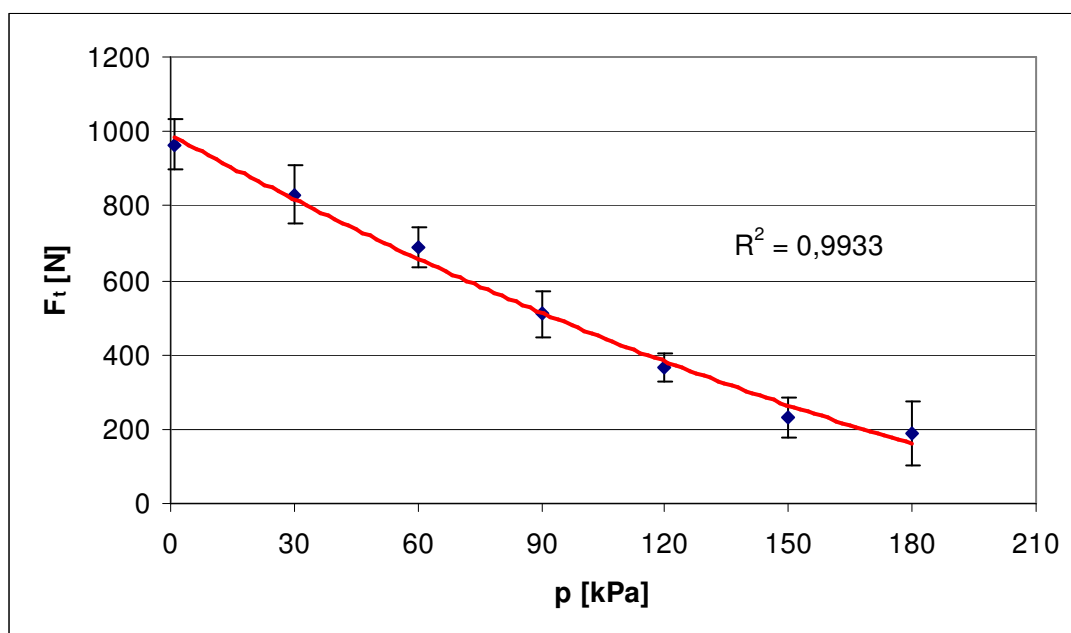
Velikost svařovacího tlaku byla při svařování měněna v rozsahu $p = 1 \text{ kPa}$ až $p = 210 \text{ kPa}$ s odstupňováním po 30 kPa .

Tab. 4.1: Naměřené hodnoty F_t odpovídající dané velikosti svařovacího tlaku

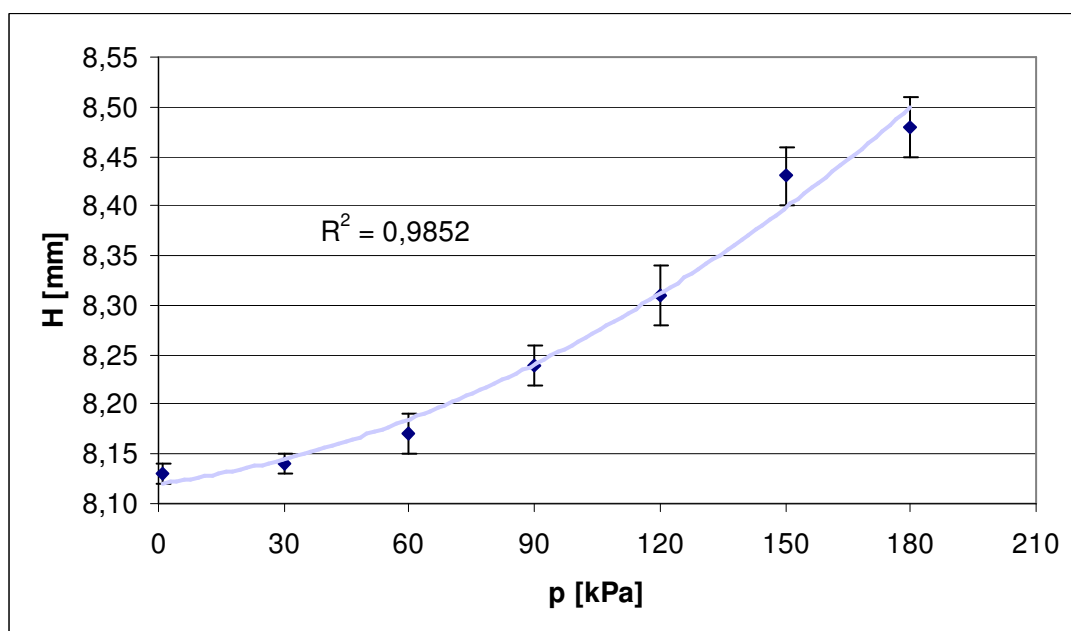
p [kPa]	1	30	60	90	120	150	180
$F_{ix} [\text{N}]$	848,00	752,00	773,50	379,50	403,50	257,50	266,00
	847,00	849,00	659,75	528,75	427,00	114,25	30,00
	997,00	769,50	635,25	533,25	341,25	200,25	275,25
	907,00	780,00	626,25	468,00	399,50	266,00	132,00
	1031,25	934,00	650,25	459,50	367,50	246,75	220,25
	955,00	756,80	681,00	558,75	320,50	239,25	216,00
	1013,75	953,00	757,50	483,00	327,25	155,00	222,25
	1001,25	790,50	735,00	609,75	338,00	254,00	34,75
	1022,50	787,25	746,25	545,25	399,50	276,75	256,00
	1022,50	937,00	634,50	537,00	332,50	297,50	221,25
$F_t [\text{N}]$	965±68	831±77	690±54	510±61	366±37	231±54	187±86

Tab. 4.2: Naměřené hodnoty H odpovídající dané velikosti svařovacího tlaku

p [kPa]	1	30	60	90	120	150	180
$H_x [\text{mm}]$	8,13	8,11	8,13	8,28	8,28	8,42	8,47
	8,14	8,14	8,15	8,25	8,32	8,46	8,48
	8,14	8,14	8,17	8,22	8,33	8,41	8,54
	8,14	8,12	8,16	8,24	8,32	8,39	8,51
	8,12	8,14	8,17	8,23	8,32	8,46	8,50
	8,12	8,14	8,15	8,25	8,35	8,36	8,44
	8,14	8,13	8,21	8,23	8,31	8,44	8,51
	8,13	8,16	8,18	8,29	8,31	8,45	8,44
	8,11	8,15	8,20	8,22	8,23	8,48	8,46
	8,13	8,13	8,14	8,22	8,35	8,44	8,47
$H [\text{mm}]$	8,13±0,01	8,14±0,01	8,17±0,02	8,24±0,02	8,31±0,03	8,43±0,03	8,48±0,03



Obr. 4.1: Průběh vlivu velikosti svařovacího tlaku na pevnost svarového spoje



Obr. 4.2: Průběh vlivu velikosti svařovacího tlaku na výsledný rozměr svarového spoje

4.1.1. Vyhodnocení vlivu velikosti svařovacího tlaku na pevnost a rozměr svarového spoje

Z grafů (viz. obr. 4.1 a obr. 4.2) je patrné, že velikost používaného svařovacího tlaku má velký vliv na pevnost a rozměry svarového spoje. Největší pevnosti svaru a zároveň nejlepšího měřeného rozměru svařence (rozměru nejvíce odpovídajícímu požadované hodnotě H), bylo dosaženo při nejnižším použitém svařovacím tlaku $p = 1$ kPa. S rostoucím svařovacím tlakem docházelo ke klesání pevnosti svaru a k zvětšování výsledného měřeného rozměru svařence. Při hodnotě svařovacího tlaku $p = 210$ kPa byla pevnost svaru už tak nízká, že docházelo k poškození svarového spoje během vyjmutí ze svařovacího přípravku a tudíž nebylo možné danou hodnotu pevnosti změřit. To bylo způsobeno tím, že vrchol usměřovače energie byl stále více elasticky deformován a vtlačen do protilehlého povrchu. Tím se zvětšovala počáteční styčná plocha. S rostoucím svařovacím tlakem také klesala pohyblivost usměřovače energie a docházelo k útlumu ultrazvukových kmitů. Nárůst počáteční styčné plochy a útlum ultrazvukových kmitů mělo za následek pokles tepla vznikajícího v rozhraní spoje. S rostoucím svařovacím tlakem tak byla v rozhraní spoje roztaveno stále menší množství materiálu. Míra natavení usměřovače energie a elastická deformace svařovaných součástí se projevila na měřeném rozměru svařených součástí viz. obr. 4.2.

Při velikosti svařovacího tlaku $p = 1$ kPa bylo při svařování dosaženo optimálního roztečení taveniny v rozhraní spoje a ke vzniku malých výronků na okraji svařovaných ploch. S nárůstem svařovacího tlaku však k vytvoření výronků nedošlo vlivem nedostatku taveniny vzniklé ve spoji. Velikost svařovacího tlaku se na vzhledu svařovaných součástí nijak neprojevila, tj. nedošlo k otlacení od sonotrody nebo přípravku.

4.2. Vliv velikosti dotlaku na pevnost a rozměr svarového spoje

Pro zjištění vlivu velikosti dotlaku na pevnost a rozměr svarového spoje byly zkušební vzorky svařovány za těchto technologických parametrů:

velikost svařovacího tlaku	$p = 1 \text{ kPa}$
maximální svařovací čas	$t_m = 7 \text{ s}$
čas dotlaku	$t_d = 8 \text{ s}$
amplituda	$Y = 45 \text{ } \mu\text{m}$
mezera mezi součástmi	$h = 1 \text{ mm}$

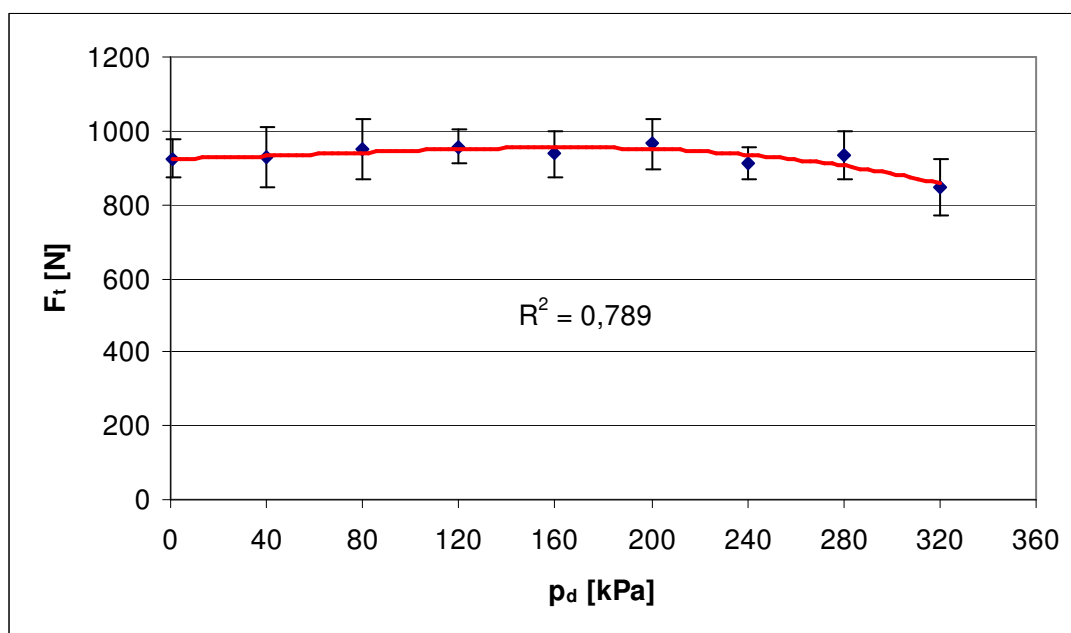
Velikost dotlaku byla při svařování měněna v rozsahu $p_d = 1 \text{ kPa}$ až $p_d = 320 \text{ kPa}$ s odstupňováním po 40 kPa .

Tab. 4.3: Naměřené hodnoty F_t odpovídající dané velikosti dotlaku

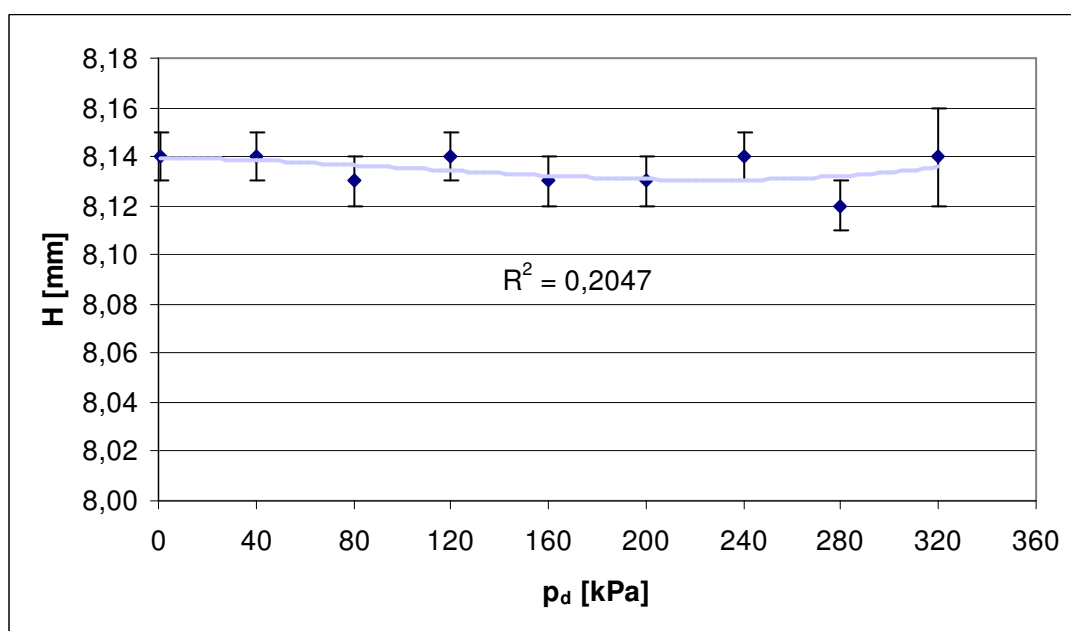
$p_d \text{ [kPa]}$	1	40	80	120	160	200	240	280	320
$F_{tx} \text{ [N]}$	973,00	789,00	1018,00	879,00	932,00	848,00	874,00	854,00	960,00
	975,00	919,00	944,00	991,00	892,00	847,00	916,00	1006,25	791,50
	989,00	1007,00	858,76	952,00	864,00	997,00	881,00	853,00	923,00
	892,00	1008,25	1037,00	948,00	1004,00	907,00	878,00	1008,75	831,00
	828,00	867,00	1017,00	880,00	884,00	1031,25	884,00	1005,00	907,00
	939,00	793,75	908,00	986,00	901,00	955,00	904,00	895,00	771,00
	849,00	910,00	776,75	1013,00	1031,00	1013,75	974,00	952,00	960,00
	962,00	975,00	913,00	922,00	860,00	1001,25	996,00	872,00	786,50
	923,00	1009,25	975,00	1012,00	997,00	1022,50	939,00	874,00	758,25
	913,00	1002,00	1030,00	994,00	1006,00	1022,50	868,00	999,00	782,00
$F_t \text{ [N]}$	924 ± 52	928 ± 83	948 ± 81	958 ± 48	937 ± 63	965 ± 68	911 ± 42	932 ± 65	847 ± 77

Tab. 4.4: Naměřené hodnoty H odpovídající dané velikosti dotlaku

$p_d \text{ [kPa]}$	1	40	80	120	160	200	240	280	320
$H_x \text{ [mm]}$	8,15	8,14	8,14	8,15	8,15	8,13	8,15	8,13	8,15
	8,15	8,14	8,13	8,14	8,14	8,14	8,14	8,10	8,13
	8,14	8,15	8,13	8,14	8,14	8,14	8,16	8,13	8,16
	8,14	8,14	8,12	8,13	8,13	8,14	8,14	8,12	8,14
	8,13	8,14	8,14	8,12	8,12	8,12	8,14	8,11	8,14
	8,14	8,13	8,12	8,13	8,14	8,12	8,13	8,12	8,17
	8,14	8,14	8,13	8,15	8,14	8,14	8,15	8,14	8,16
	8,13	8,13	8,13	8,14	8,12	8,13	8,14	8,11	8,13
	8,13	8,13	8,14	8,13	8,12	8,11	8,13	8,11	8,11
	8,14	8,13	8,13	8,12	8,12	8,13	8,12	8,13	8,12
$H \text{ [mm]}$	$8,14 \pm 0,01$	$8,14 \pm 0,01$	$8,13 \pm 0,01$	$8,14 \pm 0,01$	$8,13 \pm 0,01$	$8,13 \pm 0,01$	$8,14 \pm 0,01$	$8,12 \pm 0,01$	$8,14 \pm 0,02$



Obr. 4.3: Průběh vlivu velikosti dotlaku na pevnost svarového spoje



Obr. 4.4: Průběh vlivu velikosti dotlaku na výsledný rozměr svarového spoje

4.2.1. Vyhodnocení vlivu velikosti dotlaku na pevnost a rozměr svarového spoje

Z grafů (viz obr. 4.3 a obr. 4.4) je patrný vliv velikosti dotlaku na pevnost a rozměry vzniklého svaru. Nejlepší svarový spoj byl vytvořen za použití velikosti dotlaku v rozmezí $p_d = 160$ kPa až $p_d = 200$ kPa. Použití hodnot dotlaku nižších, než 160 kPa, mělo za následek snížení pevnosti svaru. To způsobilo nedostatečné zpevnění materiálu při tuhnutí taveniny. Použití velikosti dotlaku vyšší než $p_d = 200$ kPa naopak vneslo při tuhnutí taveniny do svaru příliš velké vnitřní pnutí. To mělo za následek snížení pevnosti zhotoveného svaru.

Při svařování bylo dosaženo optimálního roztečení taveniny v rozhraní spoje a ke vzniku malých výronků na okraji svařovaných ploch. Velikost dotlaku neměla na vytvořené výronky téměř žádný vliv. Při velikosti dotlaku nad $p_d = 200$ kPa docházelo vlivem velkého vnitřního pnutí po svařování k deformování svařených součástí v místě svaru, které se projevilo zvětšením rozptylu naměřených hodnot výsledného měřeného rozměru H viz. obr. 4.4. Při použití velikosti dotlaku $p_d = 320$ kPa se na svařovaných součástích začali projevovat stopy po otlacení od sonotrody a přípravku.

4.3. Vliv času dotlaku na pevnost a rozměr svarového spoje

Pro zjištění vlivu času dotlaku na pevnost a rozměr svarového spoje byly zkušební vzorky svařovány za těchto technologických parametrů:

velikost svařovacího tlaku	$p = 1 \text{ kPa}$
maximální svařovací čas	$t_m = 7 \text{ s}$
velikost dotlaku	$p_d = 200 \text{ kPa}$
amplituda	$Y = 45 \text{ } \mu\text{m}$
mezera mezi součástmi	$h = 1 \text{ mm}$

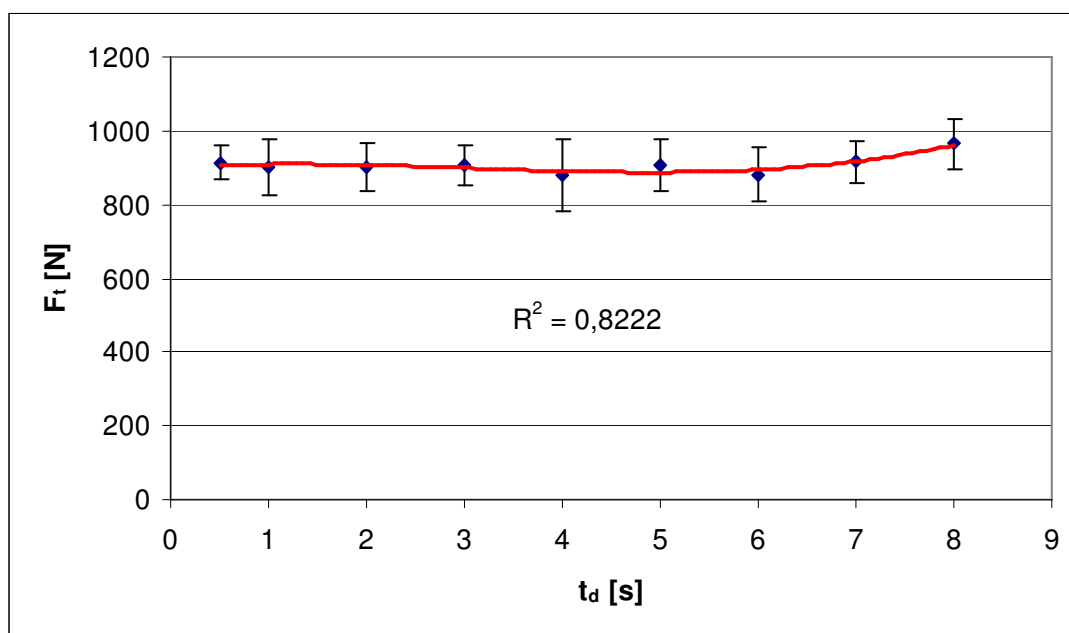
Velikost času dotlaku byla při svařování měněna v rozsahu $t_d = 0,5 \text{ s}$ až $t_d = 8 \text{ s}$. V prvním kroku byl čas dotlaku zvětšen o 0,5s. Od hodnoty $t_d = 1 \text{ s}$ byl čas dotlaku prodlužován vždy o 1 s.

Tab. 4.5: Naměřené hodnoty F_t odpovídající danému času dotlaku

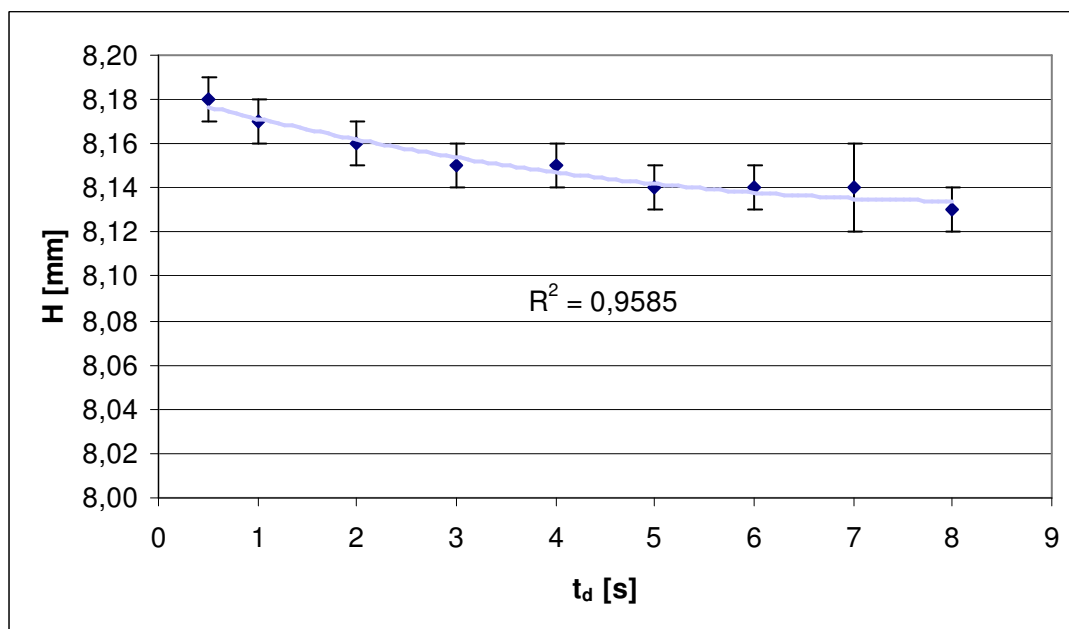
$t_d [\text{s}]$	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8
$F_{tx} [\text{N}]$	949,00	831,00	971,00	1006,25	862,00	811,00	944,00	926,00	848,00
	907,00	986,00	855,00	981,00	767,25	856,00	844,00	821,00	847,00
	939,00	826,00	911,00	904,00	850,00	990,00	793,50	990,00	997,00
	922,00	997,00	872,00	840,00	675,75	955,00	839,00	910,00	907,00
	905,00	1012,50	796,75	843,00	877,00	815,00	938,00	906,00	1031,25
	803,00	863,00	909,00	913,00	992,50	994,00	883,00	941,00	955,00
	945,00	846,00	927,00	922,00	934,00	870,00	913,00	992,00	1013,75
	951,00	835,00	969,00	875,00	987,50	955,00	988,00	835,00	1001,25
	950,00	826,00	1006,25	840,00	871,00	989,00	742,50	974,00	1022,50
	866,00	985,00	814,00	948,00	988,00	834,00	937,00	859,00	1022,50
$F_t [\text{N}]$	914±45	901±78	903±65	907±56	881±97	907±73	882±73	915±59	965±68

Tab. 4.6: Naměřené hodnoty H odpovídající danému času dotlaku

$t_d [\text{s}]$	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8
$H_x [\text{mm}]$	8,18	8,18	8,16	8,16	8,15	8,15	8,14	8,15	8,13
	8,17	8,19	8,16	8,16	8,14	8,13	8,15	8,17	8,14
	8,19	8,16	8,15	8,15	8,13	8,15	8,14	8,13	8,14
	8,18	8,17	8,16	8,14	8,15	8,13	8,15	8,13	8,14
	8,17	8,19	8,16	8,15	8,15	8,14	8,14	8,15	8,12
	8,19	8,16	8,14	8,16	8,13	8,13	8,13	8,14	8,12
	8,18	8,18	8,16	8,15	8,15	8,14	8,14	8,16	8,14
	8,18	8,17	8,16	8,16	8,16	8,13	8,14	8,11	8,13
	8,17	8,16	8,17	8,14	8,13	8,16	8,15	8,11	8,11
	8,18	8,18	8,18	8,15	8,16	8,12	8,12	8,13	8,13
	8,19	8,18	8,17	8,16	8,16	8,15	8,15	8,15	8,13
	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	±0,02	±0,01



Obr. 4.5: Průběh vlivu času dotlaku na pevnost svarového spoje



Obr. 4.6: Průběh vlivu času dotlaku na výsledný rozměr svarového spoje

4.3.1. Vyhodnocení vlivu času dotlaku na pevnost a rozměr svarového spoje

Z naměřených hodnot je patrné že svar s největší pevností byl zhotoven při času dotlaku $t_d = 8$ s. Při této hodnotě se také svařované součásti nejvíce blížily požadovanému rozměru H. Na obr. 4.6. je patrný vliv působení dotlaku na taveninu v rozhraní spoje. Je to dáno tím, že se díky působícímu dotlaku tavenina ještě během tuhnutí v malém rozsahu roztéká v rozhraní spoje. S tuhnutím materiálu se tento jev postupně zpomaluje až k úplnému zatuhnutí materiálu.

Při svařování bylo dosaženo optimálního roztečení taveniny v rozhraní spoje a ke vzniku malých výronků na okraji svařovaných ploch. Velikost času dotlaku, stejně jako u předešlého měření vlivu velikosti dotlaku, neměla na vytvořené výronky téměř žádný vliv. Velikost času dotlaku se na vzhledu svařovaných součástí nijak neprojevila, tj. nedošlo k otlacení od sonotrody nebo přípravku či k jinému poškození svařovaných součástí. V měřeném rozsahu nedošlo ani k deformování svařených součástí v místě svaru.

4.4. Vliv amplitudy ultrazvukových kmitů na pevnost a rozměr svarového spoje

Pro zjištění vlivu velikosti amplituda ultrazvukových kmitů na pevnost a rozměr svarového spoje byly zkušební vzorky svařovány za těchto technologických parametrů:

velikost svařovacího tlaku	$p = 1 \text{ kPa}$
maximální svařovací čas	$t_m = 7 \text{ s}$
velikost dotlaku	$p_d = 200 \text{ kPa}$
čas dotlaku	$t_d = 8 \text{ s}$
mezera mezi součástmi	$h = 1 \text{ mm}$

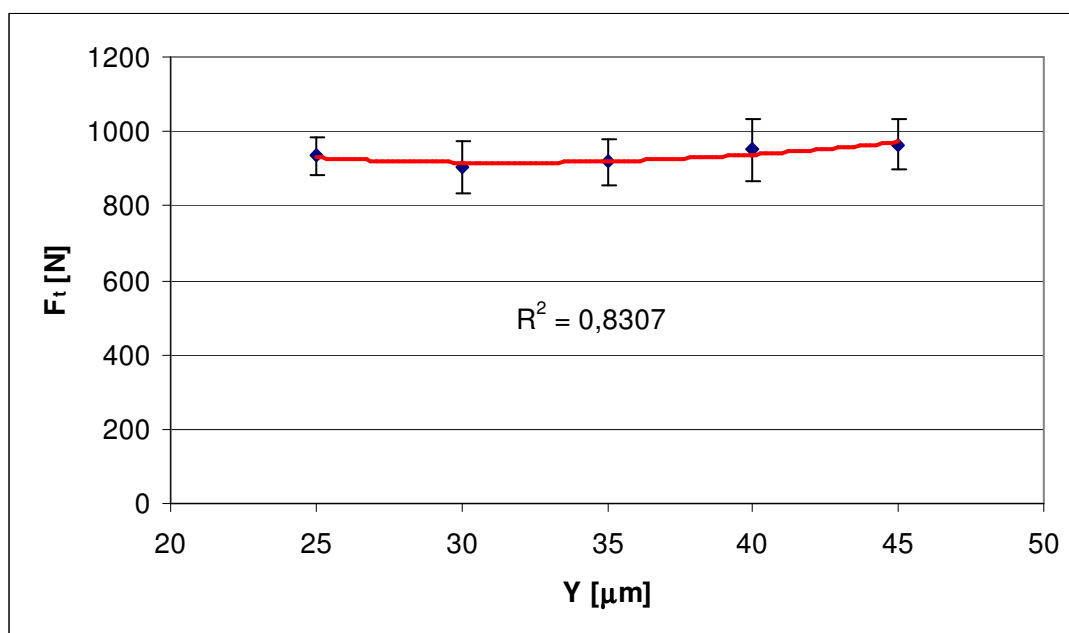
Velikost velikosti amplituda ultrazvukových kmitů byla při svařování měněna v rozsahu $Y = 25 \text{ } \mu\text{m}$ až $Y = 45 \text{ } \mu\text{m}$ s odstupňováním po $5 \text{ } \mu\text{m}$.

Tab. 4.7: Naměřené hodnoty F_t odpovídající dané amplitudě kmitů

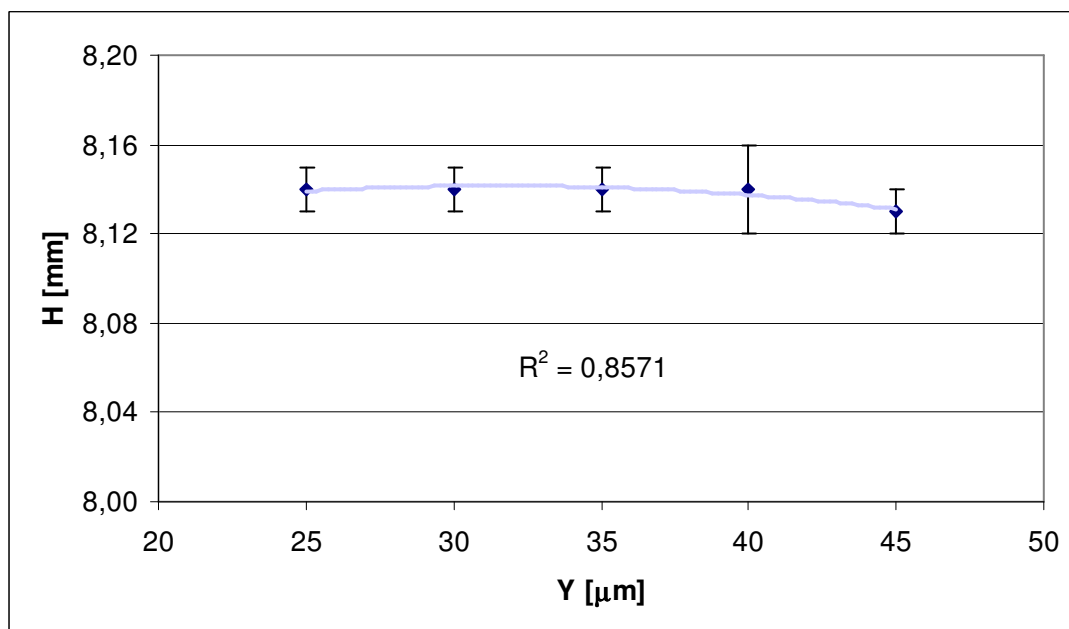
$Y \text{ } [\mu\text{m}]$	25	30	35	40	45
$F_{ix} \text{ [N]}$	971,00	739,00	942,75	919,50	848,00
	975,00	905,00	1076,00	871,50	847,00
	884,00	836,00	870,75	930,00	997,00
	934,00	940,00	911,25	959,25	907,00
	867,00	976,00	893,25	880,50	1031,25
	979,00	976,00	870,00	909,00	955,00
	878,00	970,00	833,25	968,25	1013,75
	999,00	891,00	927,75	978,50	1001,25
	989,00	926,00	903,00	1180,00	1022,50
	873,00	900,00	954,00	926,25	1022,50
$F_t \text{ [N]}$	935 ± 51	906 ± 70	918 ± 63	952 ± 83	965 ± 68

Tab. 4.8: Naměřené hodnoty H odpovídající dané amplitudě kmitů

$Y \text{ } [\mu\text{m}]$	25	30	35	40	45
$H_x \text{ [mm]}$	8,15	8,14	8,13	8,16	8,13
	8,14	8,15	8,16	8,12	8,14
	8,15	8,12	8,14	8,14	8,14
	8,13	8,13	8,13	8,13	8,14
	8,13	8,15	8,14	8,14	8,12
	8,12	8,14	8,14	8,15	8,12
	8,13	8,13	8,16	8,14	8,14
	8,14	8,13	8,13	8,11	8,13
	8,15	8,13	8,16	8,15	8,11
	8,12	8,15	8,12	8,16	8,13
$H \text{ [mm]}$	$8,14 \pm 0,01$	$8,14 \pm 0,01$	$8,14 \pm 0,01$	$8,14 \pm 0,02$	$8,13 \pm 0,01$



Obr. 4.7: Průběh vlivu amplitudy ultrazvukových kmitů na pevnost svarového spoje



Obr. 4.8: Průběh vlivu amplitudy ultrazvukových kmitů na výsledný rozměr svarového spoje

4.4.1. Vyhodnocení vlivu amplitudy ultrazvukových kmitů na pevnost a rozměr svarového spoje

Pro polymerní směsy PC/ABS je obecně doporučována hodnota amplitudy ultrazvukových kmitů $45\text{ }\mu\text{m}$. Z grafů (viz obr. 4.7 a obr. 4.8) je patrné, že nejpevnější spoj s nejlepším naměřeným rozměrem byl vytvořen právě při amplitudě ultrazvukových kmitů o velikosti $Y = 45\text{ }\mu\text{m}$, čímž se tato doporučení potvrdila. Protože zkoušený materiál byl směsí amorfních polymerů s nízkým útlumem ultrazvukových kmitů a bylo svařováno v blízkém poli, byl vliv amplitudy ultrazvukových kmitů na pevnost a rozměry spoje v daném rozsahu experimentu minimální. S klesající amplitudou však stoupal svařovací čas, neboť bylo v rozhraní spoje generováno méně tepla.

Při svařování bylo dosaženo optimálního roztečení taveniny v rozhraní spoje. S rostoucí amplitudou ultrazvukových kmitů však docházelo k výraznému nárůstu velikosti výronků na okraji svařovaných ploch. Velikost amplitudy ultrazvukových kmitů se také projevila na vzhledu svařovaných součástí. Při amplitudě $Y = 25\text{ }\mu\text{m}$ již docházelo k natavování materiálu a následnému deformování povrchu součástí v rozhraní mezi sonotrodou a vrchní spojovanou součástí a v místech kontaktu součástí s přípravkem.

4.5. Vliv mezery mezi součástmi na pevnost a rozměr svarového spoje

Pro zjištění vlivu mezery mezi součástmi na pevnost a rozměr svarového spoje byly zkušební vzorky svařovány za těchto technologických parametrů:

velikost svařovacího tlaku	$p = 1 \text{ kPa}$
maximální svařovací čas	$t_m = 7 \text{ s}$
velikost dotlaku	$p_d = 200 \text{ kPa}$
čas dotlaku	$t_d = 8 \text{ s}$
amplituda	$Y = 45 \text{ } \mu\text{m}$

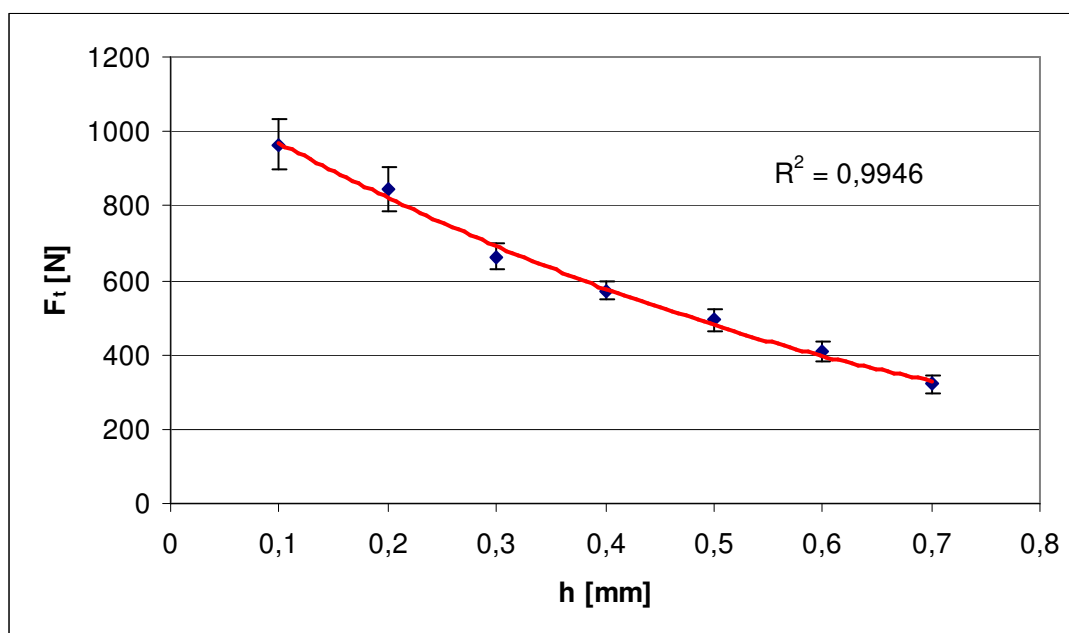
Velikost mezery mezi součástmi byla při svařování postupně zvětšována z původní hodnoty $h = 0,1 \text{ mm}$ až na hodnotu $h = 0,7 \text{ mm}$. Hodnota byla zvětšováním po $0,1 \text{ mm}$.

Tab. 4.9: Naměřené hodnoty F_t odpovídající dané mezeře mezi výrobky

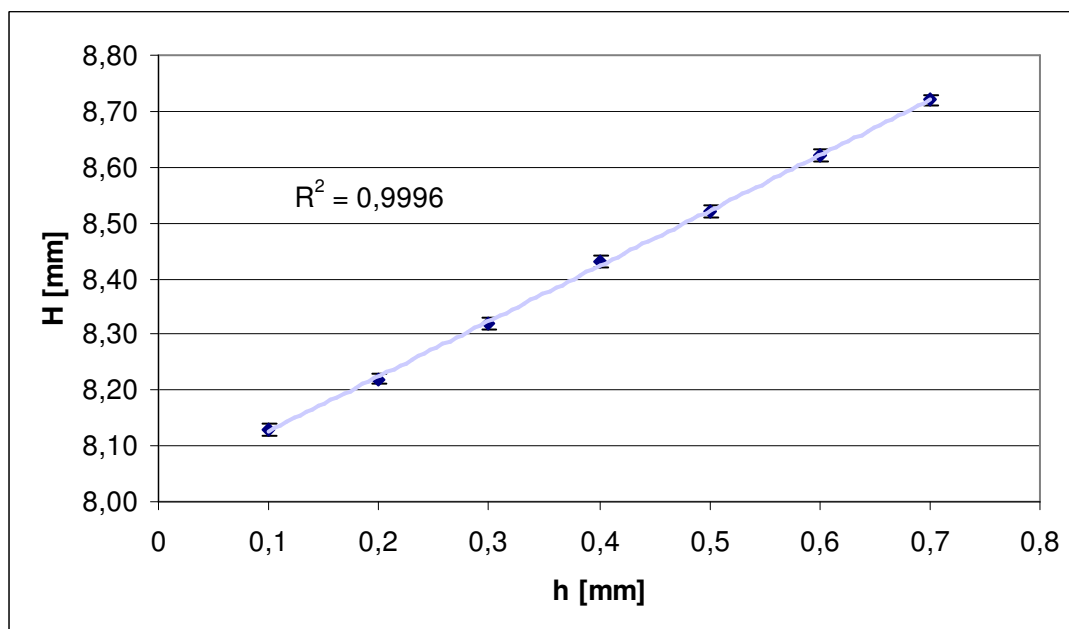
h [mm]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$F_{ix} \text{ [N]}$	848,00	798,50	729,75	594,00	462,00	450,00	309,25
	847,00	833,00	657,00	570,00	516,00	404,50	286,00
	997,00	809,00	676,50	577,50	445,50	431,00	332,75
	907,00	878,00	660,00	542,25	471,50	416,50	325,50
	1031,25	929,00	616,50	624,75	471,00	414,00	330,75
	955,00	878,00	666,00	548,25	539,25	393,25	310,50
	1013,75	847,00	723,75	556,50	516,00	386,50	306,75
	1001,25	867,00	664,50	582,00	514,50	439,50	319,50
	1022,50	712,50	621,75	552,75	476,50	354,75	388,75
	1022,50	894,00	621,00	561,75	518,25	392,75	300,75
$F_t \text{ [N]}$	965±68	845±58	664±37	571±24	493±30	408±27	321±26

Tab. 4.10: Naměřené hodnoty H odpovídající dané mezeře mezi výrobky

h [mm]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$H_x \text{ [mm]}$	8,13	8,21	8,33	8,43	8,52	8,62	8,73
	8,14	8,21	8,31	8,42	8,52	8,6	8,72
	8,14	8,21	8,33	8,43	8,52	8,62	8,72
	8,14	8,22	8,32	8,43	8,5	8,63	8,71
	8,12	8,22	8,31	8,42	8,51	8,63	8,72
	8,12	8,22	8,3	8,41	8,53	8,63	8,7
	8,14	8,23	8,32	8,43	8,52	8,63	8,72
	8,13	8,21	8,32	8,42	8,53	8,61	8,71
	8,11	8,23	8,32	8,43	8,51	8,62	8,71
	8,13	8,22	8,3	8,44	8,52	8,62	8,72
	8,13±0,01	8,22±0,01	8,32±0,01	8,43±0,01	8,52±0,01	8,62±0,01	8,72±0,01
$H \text{ [mm]}$	8,13±0,01	8,22±0,01	8,32±0,01	8,43±0,01	8,52±0,01	8,62±0,01	8,72±0,01



Obr. 4.9: Průběh vlivu mezery mezi výrobky na pevnost svarového spoje



Obr. 4.10: Průběh vlivu mezery mezi výrobky na výsledný rozměr svarového spoje

4.5.1. Vyhodnocení vlivu mezery mezi součástmi na pevnost a rozměr svarového spoje

Největší pevnosti spoje a zároveň nejlepšího rozměru svařených součástí bylo dosaženo při velikosti mezery mezi součástmi $h = 0,1$ mm. Na obr. 4.9 a obr. 4.10 je patrné, že s rostoucí mezerou mezi součástmi je roztavena stále menší část usměřovače energie. V rozhraní spoje je vytvořeno méně taveniny a díky tomu se zmenšuje i plocha spoje. S tím souvisí i snižování pevnosti svaru. Na pevnost svaru má také negativní vliv zvětšení ohybového ramene v oblasti svaru při zkoušce na trhacím stroji.

Při velikosti mezery mezi výrobky $h = 0,1$ mm bylo při svařování dosaženo optimálního roztečení taveniny v rozhraní spoje a ke vzniku malých výronků na okraji svařovaných ploch. S nárůstem velikosti mezery mezi výrobky však k vytvoření výronků nedošlo vlivem nedostatku taveniny vzniklé ve spoji. Velikost mezery mezi výrobky se na vzhledu svařovaných součástí nijak neprojevila, tj. nedošlo k otlačení od sonotrody nebo přípravku či jinému poškození svařovaných součástí

5. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zjistit vliv vybraných technologických parametrů svařovacího procesu na kvalitu svarového spoje svařovaného amorfního termoplastu bez přidaných plniv a zjistit neoptimálnější hodnoty vybraných parametrů pro zajištění kvalitního svarového spoje.. Do vybraných technologických parametrů byla zařazena velikost svařovacího tlaku, velikost dotlaku, doba dotlaku, velikost amplitudy, kterou kmitá ultrazvukový nástroj a mezera mezi výrobky. Za kvalitu svarového spoje byla pokládána pevnost a vzhled spoje.

Teoretická část obsahuje princip ultrazvukového svařování, součásti svařovacího systému a jejich funkce a svařovací cyklus. Také zde byly podrobně rozebrány vlivy na ultrazvukovou svařitelnost plastů a typy konstrukčního řešení svarových spojů a jejich vlastnosti.

V experimentální části byly vstřikováním zhotovovány dvě různé součásti z amorfního termoplastu Bayblend T65 (PC/ABS), které byly svařovány za různých vybraných technologických parametrů ultrazvukového svařovacího procesu. Pro svařování byl použit spoj na tupo s usměrňovačem energie. Po svaření byly součásti rozměrově proměřeny a na trhacím stroji byla následně zjišťována pevnost svaru. Nakonec bylo provedeno vyhodnocení naměřených výsledků a jejich následná diskuze.

Vzhledem k velkému množství činitelů ovlivňujících kvalitu výsledného svarového spoje se dají výsledky experimentu shrnout do několika doporučení pro použití parametrů ultrazvukového svařovacího procesu pro daný typ plastu a konstrukci spoje v praxi. Měřením byla potvrzena dobrá svařitelnost při hodnotě amplitudy ultrazvukových kmitů doporučené pro daný plast. Dále bylo zjištěno, že na kvalitu svarového spoje má největší vliv velikost svařovacího tlaku. Nejlepších výsledků při svařování pak bylo dosaženo při použití nižších hodnot svařovacího tlaku. Volba velikosti a času dotlaku se k dosažení kvalitního svaru ukázala také jako důležitá. Velikost a čas dotlaku musí být dostatečné, aby došlo ke zpevnění materiálu a ztuhnutí taveniny. Při použití vysokých hodnot však může dojít k velkému vnitřnímu pnutí ve svaru a tím i k snížení jeho pevnosti. Při provedeném experimentu se také ukázalo, že je výhodné použít vyšší hodnotu dotlaku, než byl tlak

svařovací. V poslední řadě byla prokázána nutnost správné volby velikosti mezery mezi svařovanými součástmi. Je-li mezera příliš velká, nedojde k roztečení taveniny v celé ploše spoje. To vede k výraznému snížení pevnosti svaru. Když je ale velikost mezery nedostatečná, je velké množství vzniklé taveniny vytlačeno z rozhraní spoje. Vzniklý svar má pak dobrou pevnost, ale špatné vzhledové vlastnosti.

Na závěr je třeba upozornit na to, že výsledky experimentu, které jsou zde uvedeny pro konkrétní materiál jsou závislé na provedení svařovacích ploch, neboť kvalitu svarového spoje také ovlivňuje tvar svařovacích ploch, jejich velikost a počet usměřovačů energie.

Seznam literatury:

- [1] MALLOY, R. A. : Plastic part design for injection molding, Hanser, 1994.
- [2] Firemní materiály DUKANE, Guide to ultrasonic plastics assembly.
- [3] <http://www.dukcorp.cz/cz/04_01_cz.html>, [6.2.2007].
- [4] <<http://plastics.bayer.com/plastics/emea/en/technology/1206/article.jsd?docId=1911&cid=1206>>, [14.3.2007].
- [5] <http://www.twi.co.uk/professional/protected/band_3/jk62.html>, [14.3.2007].
- [6] Firemní materiály BRANSON.
- [7] <http://www.branson-plasticsjoin.com/ultrasonic_design.asp>, [7.4.2007].
- [8] Propagační materiály DUKANE, Thermoplastic compatibility guide.
- [9] <<http://www.welding.cz/ultrazvuk/ultrazvuk.htm>>, [13.1.2007].
- [10] <<http://www.forwardtech.com/PlasticAssembly/Ultrasonic/>>, [14.1.2007].
- [11] <<http://www.ultrasonicweldings.com/Scarf.htm>>, [12.5.2007].
- [12] <<http://plastics.bayer.com/plastics/emea/en/cases/article.jsp?docId=322>>, [12.5.2007].
- [13] <<http://plastics.bayer.com/plastics/emea/en/cases/article.jsp?docId=305>>, [12.5.2007].

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 25.5.2007

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. Applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 25.5.2007

Signature